

Jesse Juselius

Oikosulkuvirtojen laskenta ja työmaadoitusten mitoitus Suomenojan voimalaitoksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

2.4.2014

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Tekijä Otsikko | Jesse Juselius Oikosulkuvirtojen laskenta ja työmaadoitusten mitoitus |
| Sivumäärä Aika | 56 sivua + 35 liitettä 2.4.2014 |
| Tutkinto | insinööri (AMK) |
| Koulutusohjelma | sähkötekniikka |
| Suuntautumisvaihtoehto | sähkövoimatekniikka |
| Ohjaaja(t) | lehtori Sampsa Kupari sähkömestari Timo Salo |
| <p>Tämä insinöörityö tehtiin Fortum Oy:n Suomenojan voimalaitokselle. Työssä otettiin huomioon alueen jokaisen erillisen voimalaitoksen sähköverkko sekä viisi liittymää Espoon sähköverkkoon. Lähtökohtana oli tarkastella voimalaitoksen suurimpia oikosulkuvirtoja vikatilanteen tapahtuessa C-keskuksilta mitattuna. Suomenojan voimalaitosalue on laajentunut paljon sen ensimmäisen laitoksen käyttöönotosta ja tarkkoja oikosulkuvirtoja sekä työmaadoitusten kestävyyttä ei ole tiedossa.</p> <p>Työssä selvitettiin, mitkä yksityiskohdat ja komponentit vaikuttavat oikosulkuvirtojen suuruuteen, kuinka tarvittavat komponentit pystytään määrittelemään fysiikan kaavojen avulla sekä millä menetelmillä oikosulkuvirtoja pystytään laskemaan. Tämän jälkeen työssä on laskettu suurin oikosulkuvirta halutulle keskukselle kerrallaan</p> <p>Työn tuloksena yritys sai kattavan luettelon määrättyjen keskusten oikosulkuvirto-arvoista. Työ mahdollistaa laitteiden paremman suojauksen mitoituksen, mahdollisten uusien kytkentäjärjestelyiden suunnittelemista oikosulkutehon pienentämiseksi sekä tietoa oikosulkuvirtojen määrittämisestä.</p> | |
| Avainsanat | oikosulkuvirta, impedanssi, mitoitus |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Author Title | Jesse Juselius Calculation of Short Circuit Currents at Suomenoja Power Plant |
| Number of Pages Date | 56 pages + 35 appendices 2 April 2014 |
| Degree | Bachelor of Engineering |
| Degree Programme | Electrical Engineering |
| Specialisation option | Electrical Power Engineering |
| Instructor(s) | Sampsa Kupari, Senior Lecturer Timo Salo, Electrical Project Manager |
| <p>This thesis was carried out for Fortum Oy Suomenoja powerplant. The thesis concerns the electric network of every powerplant in the Suomenoja area and five interfaces to Espoo's network. The idea was to calculate the biggest short circuit currents, when a fault occurs at specific electric centers. The industrial area of Suomenoja has expanded greatly since the introduction of the first powerplant and the specific number of short circuit current is not in known.</p> <p>First, details affecting the short circuit current, how to deal with them with help of laws of physics and how it is possible to calculate the exact short circuit current at right location are clarified. After this, there is a calculation of electrical short circuit current for each center.</p> <p>As the result, Fortum Oy got a comprehensive catalog of short circuit currents at specific centers. This thesis makes it possible for the company to create better short circuit protections for devices and to design new switching orders for isolators. Study also gives much information about how to calculate fault currents.</p> | |
| Keywords | short circuit current, impedance, design of currents |

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

| | | |
|--------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Suomenojan voimalaitos | 2 |
| 2.1 | Voimalaitoksen sähköverkko | 3 |
| 3 | Teoria | 3 |
| 3.1 | Oikosulku ja -virta | 4 |
| 3.2 | Virran laskenta ja Thevenin menetelmä | 4 |
| 3.3 | Impedanssi | 6 |
| 3.3.1 | Syöttävä verkko | 9 |
| 3.3.2 | Tahtikoneet ja generaattorit | 10 |
| 3.3.3 | Kaksikääsimuuntajat ja kuristimet | 10 |
| 3.3.4 | Kaapelit ja kiskot | 11 |
| 3.3.5 | Epätahtimoottorit | 12 |
| 3.3.6 | Tähti-kolmiomuunnos | 12 |
| 4 | Vikatilanteiden mallintaminen ja oikosulkuvirran määrittäminen | 14 |
| 4.1 | So1:n 20 kV:n keskus ja hiilimurska | 14 |
| 4.1.1 | 1CD-keskus | 14 |
| 4.1.2 | 1AJ-keskus | 15 |
| 4.2 | So1:n, So6:n ja 110 kV verkkojen Finno 3 ja Niittykumpu muodostama piiri | 17 |
| 4.2.1 | 3CU-keskus | 17 |
| 4.2.2 | 3BC-keskus | 20 |
| 4.2.3 | 1CN-keskus | 21 |
| 4.2.4 | 8CA-keskus | 23 |
| 4.2.5 | 1CH- ja 1CG-keskukset | 24 |
| 4.2.6 | 1CA- ja 1CB-keskukset | 25 |
| 4.2.7 | 1CC-keskus | 28 |
| 4.2.8 | 1BA- ja 1BB-keskukset | 29 |
| 4.2.9 | 6CA-keskus | 30 |
| 4.2.10 | 6BA-keskus | 34 |

| | | |
|--------|-----------------------------------------------------------|----|
| 4.2.11 | 6AP-keskus | 36 |
| 4.3 | So2:n ja 110kV:n Finno 1-verkon muodostama piiri | 38 |
| 4.3.1 | 2BBA- ja 2BBB-keskukset | 38 |
| 4.3.2 | 2BFC-keskus | 46 |
| 4.3.3 | 2BHA- ja 2BHB-keskukset | 48 |
| 4.3.4 | 2BFA- ja 2BFB-keskukset | 51 |
| 5 | Työmaadoitusten määrittäminen keskuksille 1AJ, 1BA ja 1BB | 54 |
| | Lähteet | 56 |
| | Liitteet | |
| | Liite 1. Muuntajat | |
| | Liite 2. Generaattorit | |
| | Liite 3. Epätahtimoottorit | |
| | Liite 4. Kaapelit | |
| | Liite 5. Kaapeleiden ominaisimpedanssit | |
| | Liite 6. Lista keskusten oikosulkuarvoista | |
| | Liite 7. Käsinsuoritettut laskutoimitukset | |

Lyhenteet

| | |
|----------|---------------------------|
| c | jännitekerroin |
| C | kapasitanssi |
| E_{th} | Thevenin jännitelähde |
| I''_Q | verkon alkuoikosulkuvirta |
| I_K | oikosulkuvirta |
| I_n | moottorin nimellisvirta |
| I_s | moottorin käynnistysvirta |
| K | kytkin |
| KL | kaukolämpö |
| kpl | kappale |
| kV | kilovoltti |
| L | induktanssi |
| $milj.$ | miljoona |
| PK | pääkisko |
| R | resistanssi |
| S''_Q | verkon alkuoikosulkuteho |
| $So1$ | Suomenojan voimalaitos 1. |

| | |
|-----------|----------------------------------|
| So2 | Suomenojan voimalaitos 2. |
| So3 | Suomenojan voimalaitos 3. |
| So6 | Suomenojan voimalaitos 6. |
| So7 | Suomenojan voimalaitos 7. |
| So8 | Suomenojan voimalaitos 8. |
| U | jännite |
| uk | muuntajan oikosulkujännite |
| X | reaktanssi |
| X_C | kapasitiivinen reaktanssi |
| x_d'' | tahtikoneen alkureaktanssi |
| X_L | induktiivinen reaktanssi |
| Z | impedanssi |
| Z_Q | verkon impedanssi |
| Z_{Rn} | rinnakkaisimpedanssi |
| Z_{Sn} | sarjaimpedanssi |
| Z_T | kokonaisimpedanssi |
| φ | sinimuotoisen sähkön tehokerroin |
| ω | kulmataajuus |

1 Johdanto

Fortum Oy on suomalainen sähköyhtiö, jonka toimintaan kuuluu sähköntuotto, -jakelu ja -myynti. Yritys on mukana myös kaukolämmön tuotannossa ja tällä saralla vuonna 2012 yltänyt maailman neljänneksi suurimmaksi kaukolämmön tuottajaksi. Fortumin arvoina pidetään vastuullisuutta, rehellisyyttä, kunnioitusta ja luovuutta. Vuonna 2013 yrityksen liikevaihto oli 6,1 milj. euroa ja vertailukelpoinen liikevoitto 1,6 milj. euroa. Konserni työllistää nykyään noin 9 900 henkilöä [1; 2].

Insinöörityössä selvitetään Fortum Oy:n Suomenojan voimalaitoksen oikosulkuarvoja määrätyissä keskuksissa ja varmistaa työmaadoitusten oikosulkuvirtakestävyys.

Haasteena toimii laitoksen suuri laajentuminen vuoden 1977 käyttöönotosta vuoteen 2014 verrattuna. Alkuperäisen hiilikäyttöisen laitoksen viereen on rakennettu vuonna 1989 valmistunut kaasuturbiinilaitos ja vuonna 2009 rakennettu kaasukombilaitos.

Työssä tarvittavat tiedot ovat peräisin voimalaitoksen arkistosta, omista mittauksista ja arvioinneista. Näitä tietoja hyödyntämällä pystytään laskemaan sähkötekniikan lakien avulla halutut suureet. Laskenta tapahtuu ilman ohjelmia.

Lopuksi työssä selvitetään, millaiset työmaadoitukset sopivat keskuksille 1AJ, 1BA ja 1BB. Kyseiset keskuksat ovat vanhoja niin kuin keskusten työmaadoituksetkin, ja tämän takia maadoitusten kestävydestä ei ole varmaa tietoa.

2 Suomenojan voimalaitos

Suomenojan voimalaitos sijaitsee Espoon Suomenojalla. Laitos rakennettiin meren rannalle vuonna 1977. Suomenojan voimalaitos jakaantuu kuuteen osaan; So1, So2, So3, So6, So7 ja So8. Näistä sähköä tuotetaan laitoksilla So1, So2 ja So6.

Suomenojalla tuotetaan sähköä neljällä generaattorilla, jotka sijaitsevat eri laitoksissa.

So1 on hiilikäyttöinen laitos joka tuottaa sekä sähköä että kaukolämpöä. Työssä tarkastellaan kuitenkin vain sähköisiä suureita, joten huomioimme 102 MVA:n generaattorin. Laitos on otettu käyttöön 1977. Puhtaampien päästörajamääräysten myötä laitokseen on tehty muutamia investointeja [3]:

- Desulphuration Plant (Semi-Dry) and additional electrical precipitator 1991.
- Low-NOx Burners + OFA 1994.
- New coal mills 1994.
- New gas/oil burners 2004.
- Low-NOx burner modernisation 2005.

So2 on Suomenojan uusi lisäys. Uuden tekniikan avulla vuonna 2009 rakennettu kaasukombilaitos pystyy tuottamaan sähköä ja kaukolämpöä korkealla hyötysuhteella maakaasua hyväksikäyttäen.

Poltetusta kaasusta syntyy pakokaasua, joka pyörittää kaasuturbiinia. Turbiinista tuleva, noin 450°C:een savukaasu ojataan lämpökattilaan, jossa pakokaasun lämmöllä tuotetaan vesihöyryä. Tämän jälkeen tulikuuma vesihöyry siirtyy höyryturbiinin läpi tuottaen samalla myös sähköä. Höyrystä otetaan kaiken lisäksi myös talteen lämpö, jota käytetään kaukolämpöverkossa. Prosessista saavutetaan jopa yli 90% yhteistuotannon hyötysuhde [4]. Generaattorit tuottavat sähkötehoa Etelä-Suomen sähköverkkoon yhteensä noin 259,2 MVA.

So6:ssa on kaasukäyttöinen turbiini, joka on valmistettu vuonna 1989. Laitos tuottaa sähköä ja kaukolämpöä. Generaattorin teho on noin 47 MVA.

2.1 Voimalaitoksen sähköverkko

Suomenojan voimalaitosverkko koostuu 110 kV:n sähkökentästä ja 20 kV:n kiskostosta, jotka ovat liitetty Espoon sähköverkkoon, neljästä generaattorista ja laitosten omakäyttösähköverkosta. Omakäyttösähkö otetaan generaattorin jälkeen omakäyttömuuntajilla tai ostetaan vaihtoehtoisesti verkosta.

So1 sisältää omat 20 kV:n ja 6 kV:n kiskostot josta suurimmat moottorilähdöt otetaan. 20 kV:n kisko on myös yhteydessä Espoon sähköverkkoon ja tätä yhteyttä käytetään varasyöttönä, kun laitos ei omakäytön kautta pysty saamaan tarvittavaa omakäyttötehoa. Tästä ja 6 kV:n kiskosta muuntajat muuntavat sähköä myös 0,4 kV:n keskuksiin. So2 omaa molemmilta generaattoreilla syötettävän 10,5 kV:n kiskoston, josta sähkö muunnetaan myös 0,69 kV:n ja 0,4 kV:n käyttöihin. Generaattoreiden rinnankäyttö on mahdollista joskin ei tarvittavaa normaaliajossa. So6:lla on käytössä 10,5 kV:n ja 6 kV:n kiskostot sekä pienjännitekeskukset.

Työssä lasketaan oikosulkuvirrat 110 kV:n kentästä C-keskuksiin saakka. Kaikki jännitemuuntajat, laitosten generaattorit ja teollisuus-sähkömoottorit, jotka käyttävät nimellijännitteenä 6 kV tai suurempaa, otettiin mukaan laskentoihin. Myös kaapeleiden pituudet huomioitiin arvioimalla ja etäisyysmittarilla mittaamalla.

3 Teoria

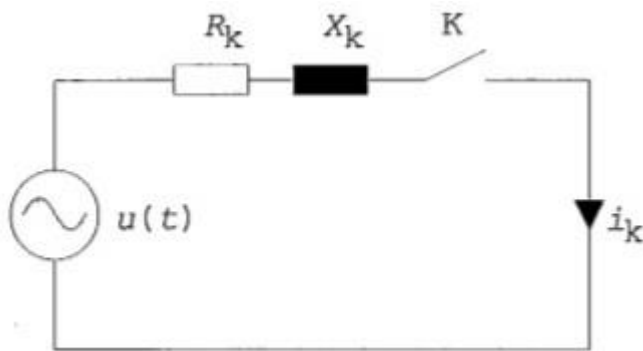
Sähkötekniikassa oikosulkuvirtojen suuruus on yksi tärkeimmistä sähkön mitoituskriteereistä. Laitteiden, komponenttien sekä johtimien tulee kestää vikatilanteesta syntyvä virtapiikki ja suojaukset tulee olla mitoitettu tarkasti reagoimaan riittävän nopeasti niin, että kalliilta materiaalivahingoilta sekä hengenvaarallisilta henkilövahingoilta pystytään välttymään.

Voimalaitoksissa muodostuu suuria oikosulkuvirtoja generaattoriden, muuntajien ja pyörivien sähkökoneiden korkean lukumäärän vuoksi, joten virran laskenta ja suojalaitteiden mitoittaminen tällaisessä ympäristössä on erityisen tärkeää [5, s. 1].

3.1 Oikosulku ja -virta

Oikosulku tarkoittaa tilannetta, missä sähköasennuksen piiri suljetaan kiinni ilman virran johtavuutta rajoittavaa tekijällä, yleensä vahingossa. Resistanssin ja vaihtosähköpiirissä impedanssin puute johtaa elektrodien suureen liikehdintään, ts. suureen sähkövirtaan, joka lämmittää piiriä korkealla lämpötilalla. Oikosulkuvirran suuruuteen vaikuttaa myös sähköpiirin jännite, jonka suuruus on suoraan verrannollinen oikosulkuvirran suuruuteen. Oikosulkuja voivat aiheuttaa eristeiden vanheneminen, tahaton maadoittaminen, ylijännitteen aiheuttama ilman ionisoituminen, mekaaninen vaurio ja ilkivalta [5, s. 1]

Edellä todettiin vaihtosähköpiirin oikosulkuvirtaan vaikuttavan piirin impedanssi ja piirin jännite. Seuraava yksivaiheinen sijaiskytkentä tarkentaa väittämää (kuva 1). Kytkimen K sulkeminen kuvaa oikosulun tapahtumista.



Kuva 1. Kuormattoman oikosulkupiirin sijaiskytkentä

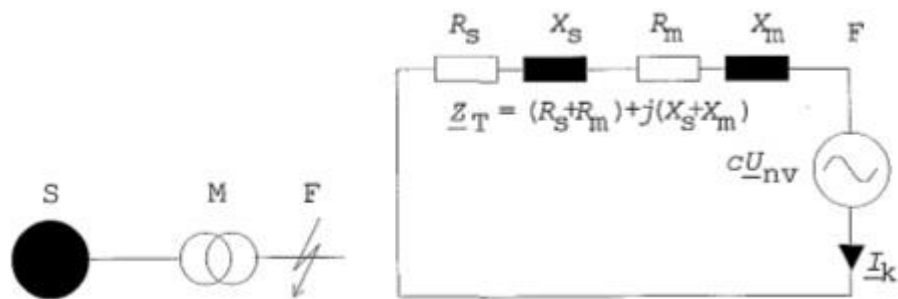
3.2 Virran laskenta ja Thevenin menetelmä

Oikosulkuvirtaa laskettaessa voidaan käyttää erilaisia menetelmiä. Suosituimpia ovat ominaisoikosulkutehoon perustuva laskenta ja Thevenin menetelmä. Thevenin menetelmällä oikosulkuvirtatarkastelu tulee tarkemmaksi sekä vaihekulmat saadaan esille. Tässä työssä ei huomioida ensimmäistä vaihtoehtoa vaan keskitytään Thevenin menetelmään.

Laskettaessa sähköverkon oikosulkuvirtoja Theveninin menetelmällä täytyy oikosukupiirin eri komponentit kuvata riittävän tarkkoilla matemaattisilla malleilla [5, s. 15].

Tärkeimmät komponentit ovat syöttävä verkko, jännitemuuntajat, generaattorit, kaapelit sekä suuret teollisuusmoottorit, joita tässä työssä luemme kaikkien yli 6kV:n verkkoon kytkettyjen olevan. Suurin osa oikosulkuvirrasta tulee verkon ja generaattoreiden syöttämänä.

Thevenin menetelmällä (kuva 2) vikakohtaan vaikuttavista laitteista tai johtimista tehdään sijaiskytkentä.



Kuva 2. Thevenin sijaispiiri verkon komponenteille [5, s. 8]

Jos piirissä on eri jännitetasoja, komponenttien impedanssit täytyy redusoida samaan jännitetasoon, kuin missä oikosulku tapahtuu. Tämä on tärkeää, sillä teollisuuslaitoksissa eri jännitetasoja on yleensä paljon.

Kun sijaiskytkentä on tehty, voidaan kolmivaiheinen oikosulkuvirta I_K määrittää seuraavalla tavalla:

$$I_K = \frac{cU}{Z_T}$$

jossa

I_K on oikosulkuvirta

U on verkon nimellisivaihejännite

Z_T on piirin kokonaisimpedanssi vikakohdan jännitteeseen
reduoituna

c on jännitekerroin

Jännitekerroin tulee valita standardin V0102-mukaisesta taulukosta (kuva 3) eri jännitetasoille. Suurimmalle ja pienimmälle lasketulle oikosulkuvirralla on omat taulukot

| Nimellisjännite U_n | Maksimioiko- sulkuvirta c_{max} | Minimioiko- sulkuvirta c_{min} |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| pienjännite 100 V – 1000 V a) 230 V / 400 V b) muut jännitteet | 1.00 1.05 | 0.95 1.00 |
| keskijännite 1 kV - 35 kV | 1.10 | 1.00 |
| suurjännite 35 kV - 230 kV | 1.10 | 1.00 |

Kuva 3. Jännitekerroimen taulukko [6]

3.3 Impedanssi

Impedanssi on vaihtosähkösuure joka kuvaa sähköisen piirin kykyä vastustaa sähkövirtaa. Oikosulkuvirtoja laskiessa piirin impedanssilla on keskeinen vaikutus laskutuloksiin. Piirin impedanssi voi joissain tapauksissa olla liian suuri, ja tämän seurauksena oikosulkuvirrasta tulee liian pieni herättämään suojalaitteet riittävän

nopeasti. Toisaalta impedanssin jäädessä liian pieneksi oikosulkuvirrat voivat muodostua liian suuriksi rikkoen komponentteja ja sulattaa kiskostoja sekä kaapeleita.

Insinööritö tehtiin teollisuusalueelle, jossa tuotetaan käytetään pääasiassa vaihtosähkösuureita. Tämän takia paneudutaan tarkemmin impedanssiin pelkän resistanssin sijaan.

Impedanssi koostuu kahdesta komponentista; resistanssista ja reaktanssista. Resisttiivinen kuorma synnyttää pätötehoa ja reaktiivinen loistehoa. Nämä suureet luokitellaan imaginäärisiksi sekä reaaliksiksi, joten laskenta ja ilmoitus suoritetaan kompleksilaskennan komponenttimuodossa. Resisttiivinen kuorma syntyy resistanssista ja reaktiivinen kuorma vaihtosähköisistä komponenteista kuten keloista ja kondensaattoreista. Reaktanssi pystytään laskemaan kaavojen mukaan. Suurimmat oikosulkuvirtaan vaikuttavat tekijät ovat muuntajat ja kuristimet, jotka koostuvat pääosin keloista eli reaktanssista:

Impedanssi pystytään laskemaan kun tiedossa ovat resistanssin ja reaktanssin suuruus. Tietyissä tilanteissa voidaan käyttää vain toista suuretta, jos suhdekulma on tiedossa:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$Z = \frac{R}{\cos \varphi}$$

$$Z = \frac{X}{\sin \varphi}$$

jossa

Z on impedanssi

R on resistanssi

X on reaktanssi

φ on suhdekulma

Jos reaktanssille ei tiedetä arvoa, se voidaan laskea induktanssin ja kapasitanssin avulla.

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$X_L = \omega L$$

$$X = X_C + X_L$$

jossa

X_C on kapasitiivinen reaktanssi

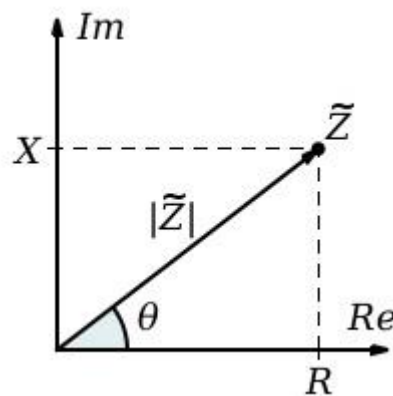
X_L on Induktiivinen reaktanssi

X on piirin reaktanssi

ω on kulmataajuus

C on kapasitanssi

L on induktanssi



Kuva 4. Impedanssin reaali- ja imaginääriosat [7]

3.3.1 Syöttävä verkko

Teollisuudessa voimalaitoksen tarkoitus on tuottaa ja syöttää sähkötehoa Suomen sähköverkkoon kuluttajille käytettäväksi. Vikatilanteessa tilanne kääntyy päinvastaiseksi, toisin sanoen verkko syöttää laitoksen vikakohtaan tehoa niin kauan, kunnes yhteys vikakohtaan katkaistaan.

Laitoksen syöttävästä piiristä halutaan tietää sen impedanssi oikosulkutilanteessa.

Tämän laskemiseksi tarvitaan verkon nimellispääjännite, oikosulkuteho alkutilanteessa ja/tai alkuoikosulkuvirta oikosulkutilanteessa. Myös kuvasta 4. (ks. s. 3) saatava jännitekerroin on ehdoton. Verkon impedanssin vian alkuhetkellä voidaan johtaa seuraavasta kaavasta:

$$Z_Q = \frac{cU_n^2}{S''_Q} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I''_Q}$$

jossa

Z_Q on syöttävän verkon impedanssi vian alkuhetkellä

U_n on syöttävän verkon nimellispääjännite

S''_Q on syöttävän verkon oikosulkuteho vian alkuhetkellä

I''_Q on syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta

c on kuvan 4. jännitekerroin

Syöttävän verkon ollessa nimellispääjännitteeltään yli 35 kV:n avojohtoverkko, voidaan verkkosyötön impedanssin ajatella koostuvan pelkästä reaktanssiosasta eli $\sim=jX$. Jos resistanssia tai reaktanssia ei tunneta, voidaan impedanssi jakaa resistanssi- ja reaktanssiosaan seuraavasti [5, s. 16]:

$$R_Q = 0,1 * X_Q, \quad X_Q = 0,995 * Z_Q$$

jossa

R_Q on syöttävän verkon resistanssi

X_Q on syöttävän verkon reaktanssi

3.3.2 Tahtikoneet ja generaattorit

Generaattori eli sähkögeneraattori on kone, joka muuttaa mekaanista liike-energiaa sähköenergiaksi. Voimalaitoksissa sähköntuotannossa käytetään yleensä vierasmagnetoitua tahtimoottoria, toisin sanoen vaihtovirtatahtigeneraattoria, sen hyvän säädettävyyden ja hyötysuhteen takia. Vikatilanteessa generaattorin syöttämä teho lisätään kohdan oikosulkutehoon ja siitä johtuvaan oikosulkuvirtaan [8]. Generaattorit ja tahtikoneet koostuvat suurimaksi osaksi käämeistä, jonka takia laskennassa keskitytään vain reaktanssiin.

Vikatilanteen jatkuessa generaattorin reaktanssi kasvaa. Ilmiö johtuu generaattorin staattorin käämien kyllästymisreaktiosta. Tätä muutosta kuvataan generaattorin suhteellisella alku-, muutos- ja tahtireaktanssi $x_d''/x_d'/x_d$:lla. Suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa haluttu arvo on alkureaktanssi, koska tällä saadaan laskettua koneen pienin reaktanssi.

Tahtikoneen muodostama pienin reaktanssi voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$X = \frac{x_d''}{100} \times \frac{U_n^2}{S_n}$$

jossa

X on tahtikoneen kokonaisreaktanssi

x_d'' on tahtikoneen alkureaktanssi prosentteina

U_n on koneen nimellisjännite

S_n on koneen nimellisteho

3.3.3 Kaksikämmimuuntajat ja kuristimet

Voimalaitoksen muuntajat vastustavat muodostuvia oikosulkuvirtoja tehokkaasti, joten nämä sekä kuristimet tulee ottaa tarkasteluun mukaan. Kuristin lasketaan samalla tavalla kuin muuntaja, muuntosuhteen ollessa yksi. [5, s. 18.]

Muuntajista tarvittavat tiedot ovat nimellisjännite, nimellisteho sekä oikosulkujännite. Sijoittamalla ylläolevat suureet seuraavaan kaavaan saadaan muuntajan impedanssi:

$$Z_T = \frac{uk}{100} \times \frac{U_n^2}{S_n}$$

jossa

Z_T on muuntajan impedanssi

uk on muuntajan oikosulkujännite prosentteina

U_n on muuntajan nimellispääjännite

S_n on muuntajan nimellisteho

3.3.4 Kaapelit ja kiskot

Sähköiset elementit ovat kytketty toisiinsa kaapeleiden ja kiskostojen avulla. Yleisesti ottaen teollisuusympäristössä kaapelit ovat hyvin lyhyitä, ja niiden vaikutus oikosulkuvirtaan ei ole suuri, mutta tässä työssä kaapelit ovat otettu huomioon. Oikosulkuvirtaa määriteltäessä saadaan tarkempi tulos mitä enemmän virtaan vaikuttavia tekijöitä otetaan huomioon. Kiskostot eivät juurikaan vastusta virran kulkua niiden suuren pinta-alan ja johtavan materiaalin takia.

Kaapeleista voidaan laskea impedanssi resistanssin ja reaktanssin avulla. Johtimen kokonaisimpedanssi kasvaa suoraan verrannollisesti johtimen pituuden kasvaessa, joten kaapelin kokonaisimpedanssi voidaan määrittää seuraavan kaavan avulla:

$$Z_j = (R + jX)l$$

jossa

Z_j on kaapelin impedanssi

R on kaapelin reaktanssi 20°C lämpötilassa

X on kaapelin reaktanssi

l on kaapelin pituus

Resistanssi, reaktanssi ja impedanssi ilmoitetaan pituusyksikköä kohden.

3.3.5 Epätahtimoottorit

Voimalaitoksissa on paljon epätahtimoottoreita, useimmiten oikosulkumoottoreita. Nämä pyörittävät laitteita, jotka ovat tärkeitä voimalaitoksen toiminnalle. Kuten tahtikoneet tulee epätahtimoottoritkin ottaa huomioon oikosulkuvirtoja laskettaessa. Epätahtimoottoreista halutaan saada impedanssi selville, mutta jos halutaan suurempi oikosulkuvirran, eli pienimpi impedanssin selville, tarvitaan koneen käynnistysvirta-arvoa laskennoissa.

Epätahtimoottoreita mallinnettaessa ei jokaista moottoria tarvitse erikseen mallintaa, jos moottoreiden lukumäärä on suuri. Moottoreista voidaan tehdä muuntajakohtaiset ekvivalenttimoottorit [5, s. 20.]. Insinööriyötä tehtävään laitokseen ei kuitenkaan kuulunut kuin muutama suurjännite-epätahtimoottori, joten kukin moottori mallinnettiin erikseen. Epätahtimoottori voidaan mallintaa seuraavasti:

$$Z_m = \frac{1}{I_s/I_n} \times \frac{U_n^2}{S_n}$$

jossa

Z_m on moottorin impedanssi

I_s on moottorin käynnistysvirta

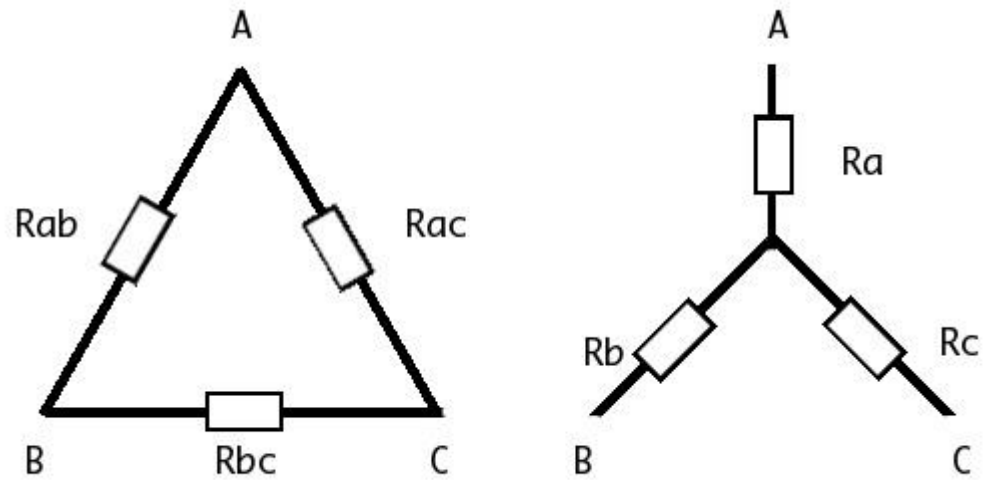
I_n on moottorin nimellisvirta

U_n on moottorin nimellisjännite

S_n on moottorin nimellisteho

3.3.6 Tähti-kolmiomuunnos

Laitoksen oikosulkupiirejä laskettaessa ja yksinkertaistaessa törmätään kytkentöihin, joiden laskemiseen tarvitaan tähti-kolmiomuunnosta. Tähti-kolmiomuunnoksessa tietty kytkentä voidaan muuttaa erilaiseen muotoon ja siten helpottaa kytkennän kokonaisimpedanssin ratkaisemista. Korvatuille impedansseille lasketaan uuden arvot seuraavien kaavojen avulla:



Kuva 5. Kolmio-tähtimuunnos [9]

Muunnos kolmiosta tähteen [9]:

$$R_a = \frac{R_{ab} * R_{ac}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}}$$

$$R_b = \frac{R_{ab} * R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}}$$

$$R_c = \frac{R_{bc} * R_{ac}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}}$$

Muunnos tähdestä kolmioon [9]:

$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a * R_b}{R_c}$$

$$R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b * R_c}{R_a}$$

$$R_{ac} = R_a + R_c + \frac{R_a * R_c}{R_b}$$

4 Vikatilanteiden mallintaminen ja oikosulkuvirran määrittäminen

Laitoksella tarkasteltiin oikosulkuvirtoja valituille C-keskuksille saakka. Tarkoituksena on määrittää oikosulkuvirrat Thevenin menetelmällä. Laskenta tehtiin ensin So1:n ja So6:n laitoksilla, sillä ne syöttävät eri verkkoa kuin So2. Komponenttien arvot, joilla impedanssit ovat laskettu, löytyvät liitteistä 1 - 5.

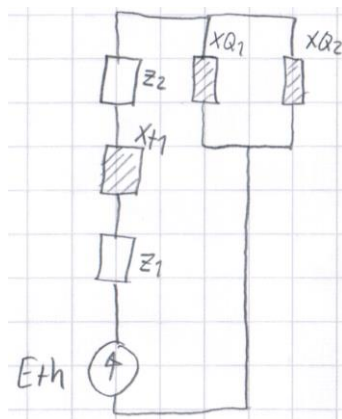
4.1 So1:n 20 kV:n keskus ja hiilimurska

Laitosalueen yksi kolmesta Espoon sähköverkkoon kytketystä kohdasta on 20 kV:n linjamuuntajat. Muuntajia on kaksi, jotka ovat kytketty rinnan. Normaaliajossa käytössä on vain yksi muuntaja. Muuntajat ovat merkitty numeroilla 3916 ja 239.

4.1.1 1CD-keskus

1CD-keskus syöttää So1:n hiilenkuljetinta ja hiilimurskaajaa. Syöttö keskukselle tulee 1CT07-muuntajan takana olevasta 1AJ 20kV-kiskostolta. Kiskolle tulee syöttö kahden linjamuuntajan, 3916 ja 239, kautta (kuva 6).

Jos keskuksessa syntyy oikosulku linjamuuntajan vaihtotilanteessa, eli muuntajien ollessa rinnankytkettyinä, oikosulkuvirta on suurempi:



Kuva 6. Keskus syötettynä kahdella verkon muuntajalla

Lasketaan kahden rinnankytketyn muuntajan yhteenlaskettu reaktanssi:

$$X_{Q1+Q2} = X_{Q1} || X_{Q2} = \frac{1}{0,0001 + j0,0001} + \frac{1}{0,0001 + j0,0001} = 0,00005 + j0,00005 \text{ ohm}$$

Piirin kokonaisimpedanssi:

$$Z_{total} = X_{Q1+Q2} + Z_2 + X_{T1} + Z_1 = 0,021 + j0,0221 \rightarrow 0,03[37,7^\circ \text{ ohm}$$

Oikosulkuvirta:

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,03[37,7^\circ]} = 7\,666,7[-37,7^\circ \text{ A}$$

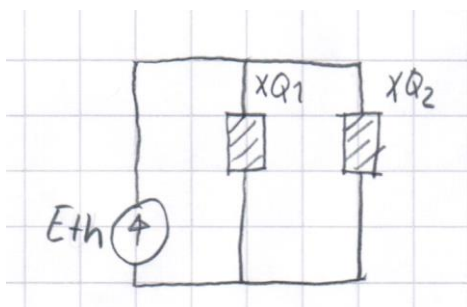
Lasketaan yhden linjamuuntajan syöttämä oikosulkuvirta:

$$Z_{total2} = X_{Q1} + Z_2 + X_{T1} + Z_1 = 0,021 + j0,0226 \rightarrow 0,031[47,1^\circ \text{ ohm}$$

$$I_{K2} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,031[47,1^\circ]} = 7\,419[-47,1^\circ$$

4.1.2 1AJ-keskus

1AJ:tä syöttää kaksi linjamuuntajaa, jotka ovat yhteydessä Espoon sähköverkkoon (kuva 7). Vikatilanteessa 1AJ on mahdollista kytkeä syöttämään So1 omakäyttösähköä. Tämä on kuitenkin poikkeustilanne ja oikosulkuvirran suuruutta kyseisessä tilanteessa ei tarkastella.



Kuva 7. Keskus syötettynä kahdella verkkomuuntajalla

Verkkojen reaktanssit redusoituna 20 kV:lle ovat:

$$X_{Q1} = 0,1745 + j1,745 \text{ ohm}, \quad X_{Q2} = 0,22 + j2,2 \text{ ohm}$$

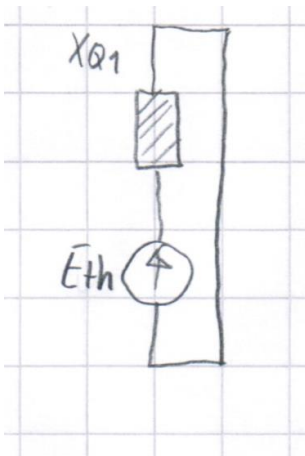
Verkkojen impedanssi rinnankytkettyinä:

$$Z_{total} = X_{Q1+Q2} = X_{Q1} || X_{Q2} = \frac{1}{0,1745 + j1,745} + \frac{1}{0,22 + j2,2} = 0,097 + j0,97 \rightarrow 0,97 \angle 84^\circ$$

Oikosulkuvirta:

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 * 20000}{\sqrt{3} * 0,97 \angle 84^\circ} = 13\,095 \angle -84^\circ \text{ A}$$

Kokonaisimpedanssi ja oikosulkuvirta yhdellä syöttömuuntajalla (kuva 8):



Kuva 8. Keskus syötettynä yhdeltä verkkomuuntajalta

$$Z_{total} = X_{Q1} = 0,1745 + j1,745 \rightarrow 1,75 \angle 84^\circ$$

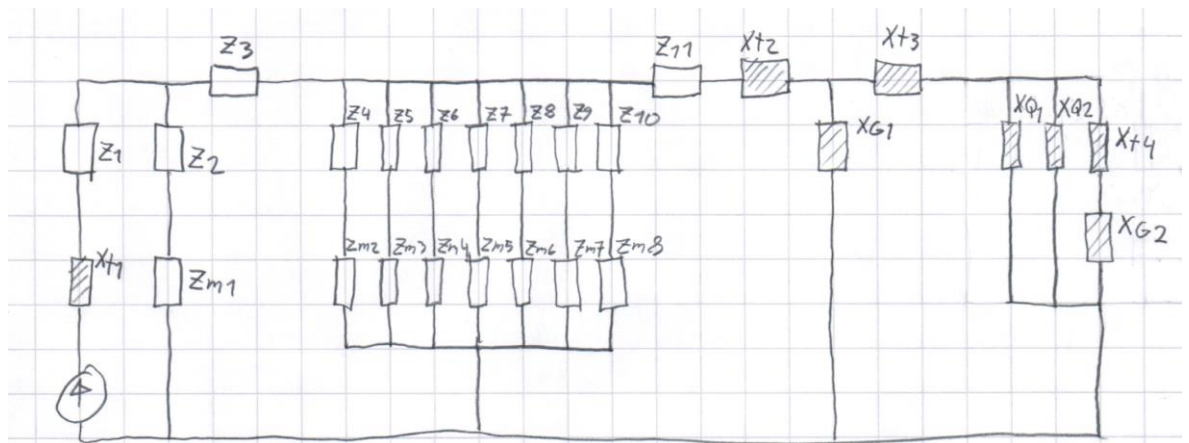
$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 * 20000}{\sqrt{3} * 1,75 \angle 84^\circ} = 7\,258 \angle -84^\circ$$

4.2 So1:n, So6:n ja 110 kV verkkojen Finno 3 ja Niittykumpu muodostama piiri

110 kV:n kiskosto jakaa sähköä kolmeen sähköverkkoon; Finno 1, Finno 3 ja Niittykumpu. Laitokset on jaettu niin, että So1 ja So6 tuottavat sähköä Finno 3:een ja Niittykumpuun PK1:n kautta ja So2 tuottaa sähköä molemmilla generaattoreillaan Finno 3:en PK2:n kautta. Edellä mainitun takia oikosulkuvirran määrittäminen on siis jaettu eri osiin. Tässä osassa keskitymme PK1:n liittyviin keskuksiin.

4.2.1 3CU-keskus

3CU on kuumavesikattilalaitoksen 400 V:n keskus, jonka oikosulkupiiriin Thevenin menetelmällä kuuluu oma muuntaja 3CT10, kahdeksan eri keskijännitemoottoria, So1 omakäyttö- sekä päämuuntaja, PK1:een liittyvät kaksi verkkoa sekä So6 ja sen päämuuntaja ja generaattori (kuva 9). Tapauksessa pidettiin yhteyksiä 1AJ05-3BC06 sekä 1AJ02-1CN auki.



Kuva 9. Keskuksen oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

Taulukko 1. Piirin komponenttien arvot, jossa Z_n =kaapelin-, X_{Tn} =muuntajan-,
 X_{Gn} =generaattorin-, X_{Qn} =verkon- ja Z_{mn} =moottorin impedanssi

| | Ohm | | | Ohm | | | Ohm |
|-----|-------------------|--|-----------------|------------|--|-----------------|-----------------|
| Z1 | 0,00001 +j0,00001 | | X _{T1} | 0 +j0,0047 | | Z _{m1} | 0,0080 +j0,0140 |
| Z2 | 0,00001 +j0,00004 | | X _{T2} | 0 +j0,0010 | | Z _{m2} | 0,0076 +j0,0131 |
| Z3 | 0,00002 +j0,00001 | | X _{T3} | 0 +j0,0001 | | Z _{m3} | 0,0076 +j0,0131 |
| Z4 | 0,00003 +j0,00001 | | X _{T4} | 0 +j0,0003 | | Z _{m4} | 0,0076 +j0,0131 |
| Z5 | 0,00003 +j0,00001 | | | | | Z _{m5} | 0,0100 +j0,0180 |
| Z6 | 0,00002 +j0,00001 | | X _{G1} | 0 +j0,0003 | | Z _{m6} | 0,0100 +j0,0180 |
| Z7 | 0,00006 +j0,00002 | | X _{G2} | 0 +j0,0004 | | Z _{m7} | 0,0017 +j0,0030 |
| Z8 | 0,00006 +j0,00002 | | | | | Z _{m8} | 0,0017 +j0,0030 |
| Z9 | 0,00001 +j0,00001 | | X _{Q1} | 0 +j0,0001 | | | |
| Z10 | 0,00001 +j0,00001 | | X _{Q2} | 0 +j0,0001 | | | |
| Z11 | 0,00001 +j0,00001 | | | | | | |

So6:n generaattorin ja päämuuntajan sarjaimpedanssi:

$$Z_{S1} = X_{G2} + X_{T4} = 0 + j0,0007 \text{ ohm}$$

110 kV:n verkkojen ja So6:n rinnakkaisimpedanssi lisättynä näiden jälkeisen So1:n päämuuntajan, generaattorin sekä omakäyttömuuntajan ja tämän liitântäkaapelin yhteisimpedanssi:

$$\frac{1}{Z_{R1}} = \frac{1}{Z_{S1}} + \frac{1}{X_{Q1}} + \frac{1}{X_{Q2}} = \frac{1}{0 + j0,0001} + \frac{1}{0 + j0,0001} + \frac{1}{0 + j0,0007} \rightarrow Z_{R1} = 0 + j0,00005$$

$$Z_{S2} = Z_{R1} + X_{T3} = 0 + j0,00015 \text{ ohm}$$

$$\frac{1}{Z_{R2}} = \frac{1}{Z_{S2}} + \frac{1}{X_{G1}} = \frac{1}{0 + j0,00015} + \frac{1}{0 + j0,0003} \rightarrow Z_{R2} = 0 + j0,0001 \text{ ohm}$$

$$Z_{S3} = Z_{R2} + X_{T2} + Z_{11} = 0,00001 + j0,00111 \text{ ohm}$$

Lisätään So1:n 6kV:n moottoreiden redusoitu 400V:n impedanssi:

$$Z_{S4} = Z_{10} + Z_{m8} = 0,0017 + j0,003 \text{ ohm}$$

$$Z_{S5} = Z_9 + Z_{m7} = 0,0017 + j0,003 \text{ ohm}$$

$$Z_{S6} = Z_8 + Z_{m6} = 0,0101 + j0,018 \text{ ohm}$$

$$Z_{S7} = Z_7 + Z_{m5} = 0,0101 + j0,018 \text{ ohm}$$

$$Z_{S8} = Z_6 + Z_{m4} = 0,0076 + j0,013 \text{ ohm}$$

$$Z_{S9} = Z_5 + Z_{m3} = 0,0076 + j0,013 \text{ ohm}$$

$$Z_{S10} = Z_4 + Z_{m2} = 0,0076 + j0,013 \text{ ohm}$$

$$\frac{1}{Z_{R3}} = \frac{1}{Z_{S3}} + \frac{1}{Z_{S4}} + \dots + \frac{1}{Z_{S10}}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_{R3}} = & \frac{1}{0,00001 + j0,00111} + \frac{1}{0,0017 + j0,003} + \frac{1}{0,0017 + j0,003} \\ & + \frac{1}{0,0101 + j0,018} + \frac{1}{0,0101 + j0,018} + \frac{1}{0,0076 + j0,013} \\ & + \frac{1}{0,0076 + j0,0013} + \frac{1}{0,0076 + j0,0013} \end{aligned}$$

$$Z_{R3} = 0,00001 + j0,0005 \text{ohm}$$

$$Z_{S11} = Z_{R3} + Z_3 = 0,00003 + j0,00051 \text{ohm}$$

$$Z_{S12} = Z_2 + Z_{m1} = 0,008 + j0,014 \text{ohm}$$

$$\frac{1}{Z_{R4}} = \frac{1}{Z_{S11}} + \frac{1}{Z_{S12}} = \frac{1}{0,00003 + j0,00051} + \frac{1}{0,008 + j0,014} \rightarrow Z_{R4} = 0,000029 + j0,00049 \text{ohm}$$

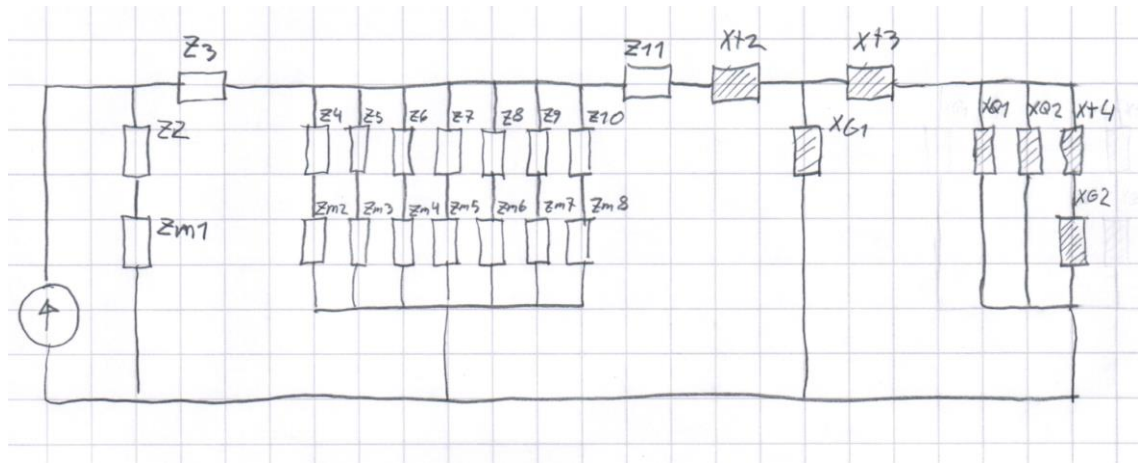
Kokonaisimpedanssi ja oikosulkuvirta keskuksessa:

$$Z_{total} = Z_{R4} + Z_1 + X_{T1} = 0,00004 + j0,0052 \text{ohm} \rightarrow 0,0052 \angle 89,5^\circ \text{ohm}$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,0052 \angle 89,5^\circ} = 44\,231 \angle -89,5^\circ \text{A}$$

4.2.2 3BC-keskus

3BC on So3:n 6,3 kV:n keskus joku kuuluu So1:n omakäyttöpiiriin. Oikosulkupiiri näyttää lähes samalta kuin edellisellä 3CU-keskuksella muutaman komponentin puuttumista lukuun ottamatta (kuva10).



Kuva 10. Keskuksen oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

Kokonaisimpedanssi 6,3 kV:n keskukselle laskettiin 400 V:lle edellisen keskuksen oikosulkuvirran määrittämisessä. Impedanssi tulee muuntaa vastaamaan oikosulkukohdan nimellisjännitettä. Redusoidaan siis seuraavasti:

$$Z_{total400V} = 0,00049[86,6^\circ \text{ohm}]$$

$$Z_{total6,3kV} = \left(\frac{6,3}{0,4}\right)^2 * 0,00049[86,6^\circ] = 0,122[86,6^\circ \text{ohm}]$$

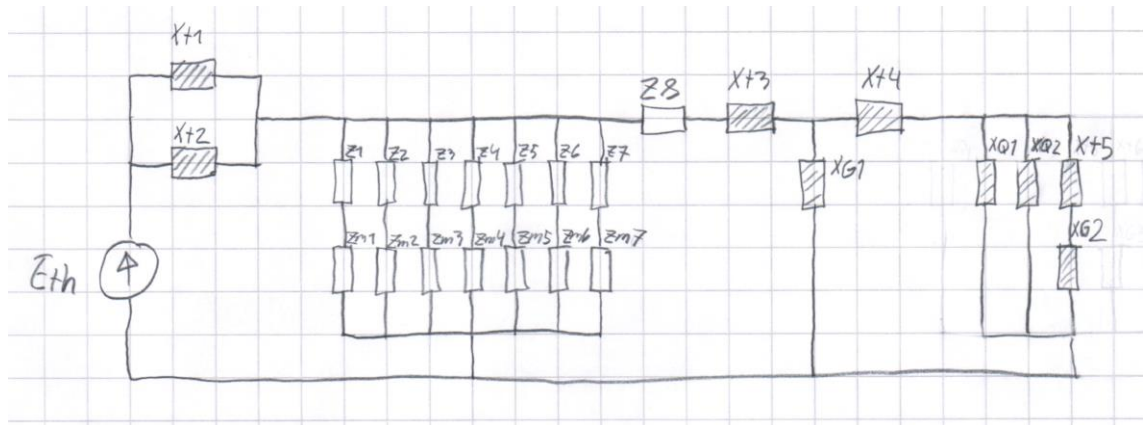
$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 * 6300}{\sqrt{3} * 0,122[86,6^\circ]} = 32,8[-86,6^\circ \text{kA}]$$

4.2.3 1CN-keskus

1CN on So1:n 400 V:n omakäyttösähkökeskuksia. Keskus saa syöttönsä 6,3 kV:n kiskolta. Syöttö kulkee 1CH-keskuksen läpi. 1CH on myös 400 V:n keskus, joten syötössä käytetään 1CT04-muuntajaa. Oikosulkupiiriin kuuluu mukaan myös 8 keskijännitemoottoria. Vikavirran määrittämisessä käytetään vain 7 moottoria, sillä yksi moottori saa syöttönsä So3:n kautta ja näin vaikutus vikavirtaan jää vähäiseksi. Oikosulkupiiriin kuuluu myös kaksi generaattoria, omakäyttömuuntajat ja kaksi yhteyttä Espoon sähköverkkoon. Laskenta suoritetaan myös 1CH- ja 1CG-keskuksen

rinnankäytöllä, sillä edellä mainittujen keskuksien muuntajat voidaan kytkeä yhteen ja näin rinnansyötöstä johtuva oikosulkuvirta on suurempi.

Oikosulun tapahtuessa 1CH:n ja 1CG:n rinnankäytön aikana (kuva 11):



Kuva 11. Keskuksen oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

$$X_{T1} = 0 + j0,0057\text{ohm}, \quad X_{T2} = 0 + j0,0057\text{ohm}$$

$$X_{T1} || X_{T2} = \frac{1}{0 + j0,0057} + \frac{1}{0 + j0,0057} = 0 + j0,00285\text{ohm}$$

6,3 kV:n moottoreilta 110 kV:n kiskostoon kokonaisimpedanssi on laskettu 3CU-keskus-luvussa (4.2.1).

$$Z_{6,3kV-110kV} = 0,00001 + j0,0005\text{ohm}$$

Kokonaisimpedanssi sekä oikosulkuvirta keskuksella:

$$Z_{total} = Z_{6,3kV-110kV} + X_{T1} || X_{T2} = 0,00001 + j0,0005 + 0 + j0,00285$$

$$Z_{total} = 0,00001 + j0,00335 \rightarrow 0,00335[89,8^\circ]$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,00335[89,8^\circ]} = 68\,657[-89,8^\circ]\text{A}$$

Vian sattuessa ilman muuntajien 1CT04 ja 1CT03 rinnankäyttöä:

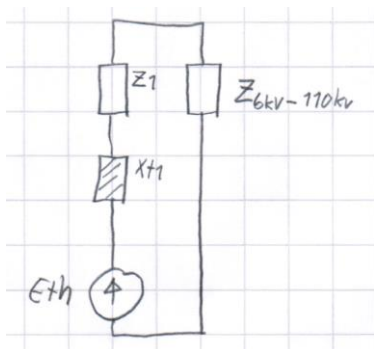
$$Z_{total} = X_{T1} + Z_{6,3kV-110kV} = 0,00001 + j0,0005 + 0 + j0,0057$$

$$Z_{total} = 0,00001 + j0,0062 \text{ ohm} \rightarrow 0,0062 \angle 89,9^\circ \text{ ohm}$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,0062 \angle 89,9^\circ} = 37\,097 \angle -89,9^\circ \text{ A}$$

4.2.4 8CA-keskus

8CA on rikinpoistolaitoksen 400 V:n sähkökeskus. Syöttö tulee 6,3 kV:n kiskolta 1BA11. Matka keskijännitekiskostosta 8CA-keskukselle on pitkä ja tämän takia syöttöjohdon pituus on laitoksen pisimpiä. Oikosulkupiiriin kuuluu rikinpoistolaitoksen oma muuntaja 8CT08, So1:n keskijännitemoottorit sekä So1:n ja So6:n generaattorit ja kaksi yhteyttä Espoon sähköverkkoon (kuva 12).



Kuva 12. Keskukseen oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

$$X_{T1} = 0 + j0,0051 \text{ ohm}, \quad Z_1 = 0,00008 + j0,00005 \text{ ohm}$$

6,3 kV:n moottoreilta 110 kV:n kiskostoon kokonaisimpedanssi on laskettu 3CU-keskus-luvussa (4.2.1).

$$Z_{6,3kV-110kV} = 0,00001 + j0,0005ohm$$

Kokonaisimpedanssi ja oikosulkuvirta keskuksella:

$$Z_{total} = Z_{6,3kV-110kV} + X_{T1} + Z_1 = 0,00009 + j0,00565ohm \rightarrow 0,0057[89,1^\circ$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,0057[89,1^\circ} = 40\,351[-89,1^\circ A$$

4.2.5 1CH- ja 1CG-keskukset

Keskukset toimivat So1:n omakäyttösähkökeskuksina. Keskuksien yhteen kytkeminen on mahdollista. Oikosulkupiiriin kuuluu keskusten omat muuntajat, So1:n keskijännitemoottorit sekä So1:n ja So6:n generaattorit ja kaksi yhteyttä Espoon sähköverkkoon.

Laskenta ilman yhteen kytkemistä:

1CH:

Oikosulkupiiriin kokonaisimpedanssi laskettu kohdassa 1CN-keskus:

$$Z_{total} = 0,00001 + j0,0062ohm \rightarrow 0,0062[89,9^\circ ohm$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,0062[89,9^\circ} = 37\,097[-89,9^\circ A$$

1CG:

1CG-keskuksen muuntaja on saman kokoinen kuin keskuksella 1CH joten kokonaisimpedanssi ja oikosulkuvirta on saman suuruinen:

$$Z_{total} = 0,00001 + j0,0062ohm \rightarrow 0,0062[89,9^{\circ}ohm$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,0062[89,9^{\circ}} = 37\,097[-89,9^{\circ}A$$

Laskenta keskusten ollessa yhdessä

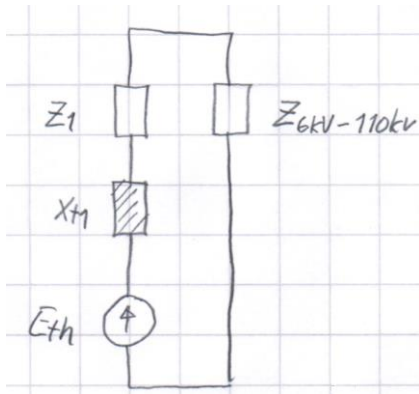
Rinnankytkettyinä kokonaisimpedanssi on laskettu kohdassa 1CN-keskus:

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,00335[89,8^{\circ}} = 68\,657[-89,8^{\circ}A$$

4.2.6 1CA- ja 1CB-keskukset

1CA ja 1CB ovat 400 V:n omakäyttösähkökeskuksia. Oikosulkupiiriin kuuluu keskusten omat muuntajat, So1:n keskijännitemoottorit sekä So1:n ja So6:n generaattorit ja kaksi yhteyttä Espoon sähköverkkoon. Keskuksien yhteen kytkeminen on mahdollista. Keskuksissa käytetään saman kokoisia muuntajia, joten erikseen käytettynä oikosulkuvirta näissä keskuksissa on saman suuruinen:

Laskenta ilman muuntajien rinnankytkentää (kuva 13):



Kuva 13. Keskusten oikosulkupiiri keskusten 1CA ja 1CB ollessa erikseen

$$X_{T1CA-1CB} = 0 + j0,0056\,ohm, \quad Z_{1CA-1CB} = 0,00001 + j0,00001$$

6,3 kV:n moottoreilta 110 kV:n kiskostoon kokonaisimpedanssi on laskettu 3CU-keskus-luvussa (4.2.1).

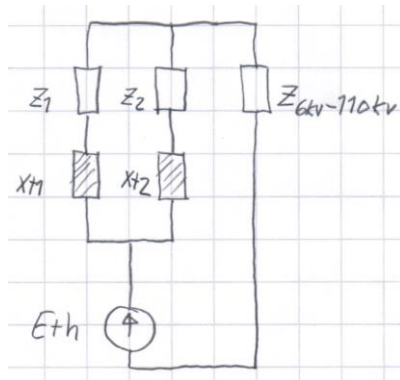
$$Z_{6,3kV-110kV} = 0,00001 + j0,0005\,ohm$$

$$\begin{aligned} Z_{total} &= Z_{6,3kV-110kV} + Z_{1CA-1CB} + X_{T1CA-1CB} \\ &= 0,00003 + j0,0005 + 0,00001 + j0,00001 + 0 + j0,0056 \end{aligned}$$

$$Z_{total} = 0,00004 + j0,00611 \rightarrow 0,0061\angle 89,6^\circ\,ohm$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,0061\angle 89,6^\circ} = 37\,705\angle -89,6^\circ A$$

Laskenta keskusten ollessa yhdessä (kuva 14):



Kuva 14. Keskusten oikosulkupiiri keskusten ollessa yhdessä

$$Z_1, Z_2 = 0,00001 + j0,00001\text{ohm}, \quad X_{T1} = 0 + j0,0056\text{ohm}, \quad X_{T2} = 0 + j0,0055\text{ohm}$$

6,3 kV:n moottoreilta 110 kV:n kiskostoon kokonaisimpedanssi on laskettu 3CU-keskus-luvussa (4.2.1).

$$Z_{6,3kV-110kV} = 0,00001 + j0,0005\text{ohm}$$

Muuntajien ja kaapeleiden kokonaisimpedanssi:

$$Z_{S1} = Z_1 + X_{T1} = 0,00001 + j0,00561\text{ohm}$$

$$Z_{S2} = Z_2 + X_{T2} = 0,00001 + j0,00551$$

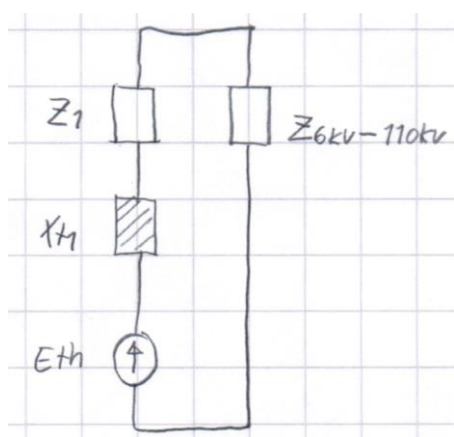
$$Z_{R1} = Z_{S1} || Z_{S2} = \frac{1}{0,00001 + j0,00561} + \frac{1}{0,00001 + j0,00551} = 0,000005 + j0,00278\text{ohm}$$

$$Z_{total} = Z_{R1} + Z_{6,3kV-110kV} = 0,000015 + j0,0033 \rightarrow 0,0033[89,3^\circ\text{ohm}$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,0033[89,3^\circ]} = 69\,697[-89,3^\circ\text{A}$$

4.2.7 1CC-keskus

1CC on 400 V:n keskus, joka sijaitsee Suomenojan voimalaitosalueen apurakennuksessa. Keskus saa syöttönsä joko 1BA03:sta tai 1BB02:sta. Nämä lähdöt ovat 6 kV:n kiskostosta, jonka takia syöttöjohto on todella pitkä. Oikosulkupiiriin kuuluu keskuksen omakäyttömuuntaja, joka sijaitse myös apurakennuksessa, sekä 6 kV:n keskijännitemoottorit ja 110 kV:n kiskoon liitetyt generaattorit päämuuntajineen (kuva 15).



Kuva 15. Keskuksen oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

Kokonaisimpedanssi ja oikosulkuvirta keskuksessa

$$X_{T1} = 0 + j0,0058, \quad Z_1 = 0,00013 + j0,00006, \quad Z_{6,3-110kV} = 0,00001 + j0,0005$$

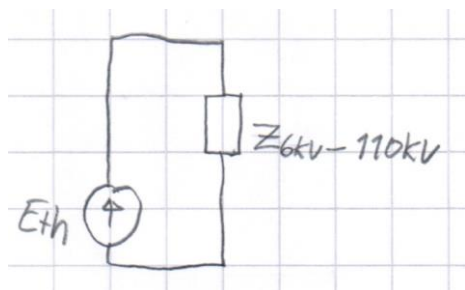
$$Z_{total} = Z_1 + X_{T1} + Z_{6,3-110kV} = 0 + j0,0058 + 0,00013 + j0,00006 + 0,00001 + j0,0005$$

$$Z_{total} = 0,00016 + j0,0064 \rightarrow 0,0064[88,6^\circ$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,0064[88,6^\circ} = 35\,938[-88,6^\circ A$$

4.2.8 1BA- ja 1BB-keskukset

1BA ja 1BB ovat So1:n 6,3 kV:n keskijännitekeskukset. Keskukset syöttävät jokaista 400 V:n keskusta ja tästä johtuu keskusten kova kuormitus. Oikosulkupiiriin kuuluu So1:n keskijännitemoottorit sekä So1:n ja So6:n generaattorit, päämuuntajat ja kaksi yhteyttä Espoon sähköverkkoon (kuva 16).



Kuva 16. Keskuksen oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

6,3 kV:n moottoreilta 110 kV:n kiskostoon kokonaisimpedanssi 400 V:lle redusoituna on laskettu 3CU-keskus-luvussa (4.2.1).

$$Z_{6,3kV-110kV} = Z_{total} = 0,00001 + j0,0005ohm \rightarrow 0,0005[88,8^\circ ohm$$

Redusoidaan nyt kokonaisimpedanssi 6,3 kV:lle:

$$Z_{total6,3kV} = \left(\frac{6,3}{0,4}\right)^2 * 0,0005[88,8^\circ = 0,124[88,8^\circ ohm$$

Lasketaan oikosulkuvirta:

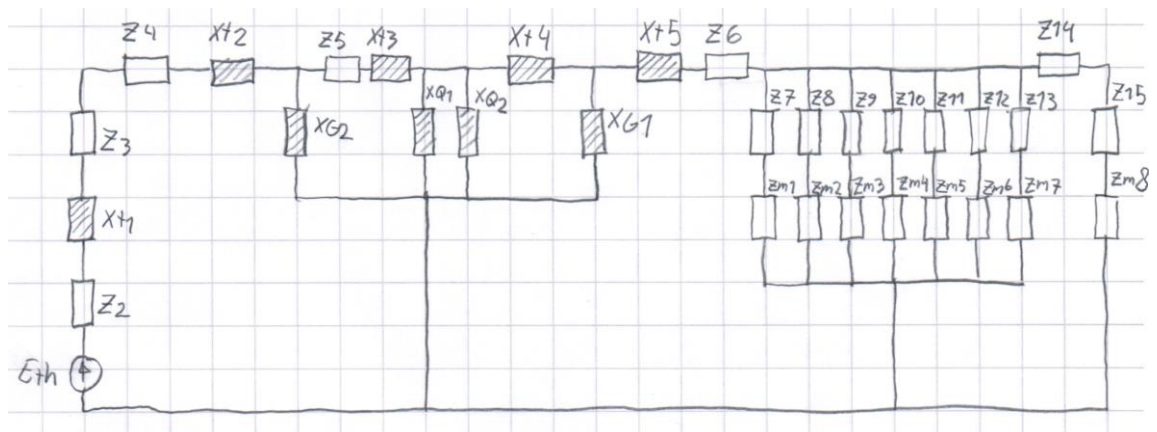
$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 * 6300}{\sqrt{3} * 0,0005[88,8^\circ} = 32\,266[-88,8^\circ A$$

4.2.9 6CA-keskus

6CA sijaitsee So6:n sähkötilassa ja on 400 V:n omakäyttösähkökeskus. 6CA saa syöttönsä So6:n 6,3 kV:n keskukselta 6BA lähdöstä 06.

Keskuksen oikosulkupiiriin kuuluu So6:n päämuuntaja, generaattori, omakäyttömuuntaja sekä 6CA-keskuksen muuntaja. Näiden lisäksi oikosulkuvirtaan vaikuttaa myös kaksi yhteyttä Espoon sähköverkkoon sekä So1:n generaattori, pää- ja omakäyttömuuntaja, että 6,3 kV:n keskijännitemoottorit (kuva 17).

So6:n käyttää So2:n pienjännite KL-pumppuja laitoksen omien pumppujen vioituttua. Nykyisin So6:n moottorit ovat vain varalla.



Kuva 17. Keskuksen oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

Taulukko 2. Piirin komponenttien arvot, jossa Z_n =kaapelin-, X_{Tn} =muuntajan-, X_{Gn} =generaattorin-, X_{Qn} =verkon- ja Z_{mn} =moottorin impedanssi

| | Ohm | | | Ohm | | | Ohm |
|-----------------|-------------------|--|-----------------|-------------|--|-----------------|-----------------|
| Z ₂ | 0 (kisko) | | X _{T1} | 0 +j0,00800 | | Z _{m1} | 0,0017 +j0,0030 |
| Z ₃ | 0,00003 +j0,00002 | | X _{T2} | 0 +j0,00400 | | Z _{m2} | 0,0017 +j0,0030 |
| Z ₄ | 0 (lyhyt johto) | | X _{T3} | 0 +j0,00026 | | Z _{m3} | 0,0100 +j0,0180 |
| Z ₅ | 0 (lyhyt johto) | | X _{T4} | 0 +j0,00010 | | Z _{m4} | 0,0100 +j0,0180 |
| Z ₆ | 0,00001 +j0,00001 | | X _{T5} | 0 +j0,00100 | | Z _{m5} | 0,0076 +j0,0131 |
| Z ₇ | 0,00001 +j0,00001 | | | | | Z _{m6} | 0,0076 +j0,0131 |
| Z ₈ | 0,00001 +j0,00001 | | X _{Q1} | 0 +j0,0001 | | Z _{m7} | 0,0076 +j0,0131 |
| Z ₉ | 0,00006 +j0,00002 | | X _{Q2} | 0 +j0,0001 | | Z _{m8} | 0,0080 +j0,0140 |
| Z ₁₀ | 0,00006 +j0,00002 | | | | | | |
| Z ₁₁ | 0,00002 +j0,00001 | | X _{G1} | 0 +j0,0003 | | | |
| Z ₁₂ | 0,00003 +j0,00001 | | X _{G2} | 0 +j0,0004 | | | |
| Z ₁₃ | 0,00003 +j0,00001 | | | | | | |
| Z ₁₄ | 0,00002 +j0,00001 | | | | | | |
| Z ₁₅ | 0,00001 +j0,00004 | | | | | | |

Lasketaan jokaisen moottorin sarjaimpedanssi:

$$Z_{S1} = Z_{14} + Z_{15} + Z_{m8} = 0,00803 + j0,01405 \text{ ohm}$$

$$Z_{S2} = Z_{13} + Z_{m7} = 0,0076 + j0,0131 \text{ ohm}$$

$$Z_{S3} = Z_{12} + Z_{m6} = 0,0076 + j0,0131 \text{ ohm}$$

$$Z_{S4} = Z_{11} + Z_{m5} = 0,0076 + j0,0131 \text{ ohm}$$

$$Z_{S5} = Z_{10} + Z_{m4} = 0,0101 + j0,0180 \text{ ohm}$$

$$Z_{S6} = Z_9 + Z_{m3} = 0,0101 + j0,0180 \text{ ohm}$$

$$Z_{S7} = Z_8 + Z_{m2} = 0,0017 + j0,0030 \text{ ohm}$$

$$Z_{S8} = Z_7 + Z_{m1} = 0,0017 + j0,0030 \text{ ohm}$$

Moottoreiden rinnakkaisimpedanssi:

$$Z_{R1} = Z_{S1} + Z_{S2} + \dots + Z_{S8}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_{R1}} = & \frac{1}{0,00803 + j0,01405} + \frac{1}{0,0076 + j0,0131} + \frac{1}{0,0076 + j0,0131} + \frac{1}{0,0076 + j0,0131} \\ & + \frac{1}{0,0101 + j0,018} + \frac{1}{0,0101 + j0,018} + \frac{1}{0,0017 + j0,003} \\ & + \frac{1}{0,0017 + j0,003} \end{aligned}$$

$$Z_{R1} = 0,00053 + j0,00093ohm$$

Lisätään So1:n omakäyttömuuntajan ja tämän kaapelin impedanssi, sekä lasketaan rinnanimpedanssi So1:n generaattorin kanssa:

$$Z_{S9} = Z_{R1} + Z_6 + X_{T5} = 0,00054 + j0,00194ohm$$

$$Z_{R2} = Z_{S9} + X_{G1}$$

$$\frac{1}{Z_{R2}} = \frac{1}{0,00054 + j0,00194} + \frac{1}{0 + j0,0003} = 0,00054 + j0,00026ohm$$

Lisätään sarjassa olevan päämuuntajan impedanssi ja lasketaan tämän jälkeinen rinnanimpedanssi verkkojen X_{Q1}:n ja X_{Q2}:n kanssa:

$$Z_{S10} = Z_{R2} + X_{T4} = 0,00054 + j0,00036ohm$$

$$Z_{R3} = Z_{S10} + X_{Q1} + X_{Q2}$$

$$\frac{1}{Z_{R3}} = \frac{1}{0,00054 + j0,00036} + \frac{1}{0 + j0,0001} + \frac{1}{0 + j0,0001} = 0,00054 + j0,000044ohm$$

Lisätään sarjassa olevien So6:n päämuuntajan ja tämän johdon impedanssi, jonka jälkeen lasketaan rinnalle tulevan So6:n generaattorin yhteisimpedanssi:

$$Z_{S11} = Z_{R3} + X_{T3} + Z_5 = 0,00054 + j0,000304\text{ohm}$$

$$Z_{R4} = Z_{S11} + X_{G2}$$

$$\frac{1}{Z_{R4}} = \frac{1}{0,00054 + j0,000304} + \frac{1}{0 + j0,0004} = 0,00054 + j0,00017\text{ohm}$$

Lasketaan kokonaisimpedanssi ja oikosulkuvirta keskuksella:

$$Z_{total} = Z_{R4} + X_{T2} + Z_4 + Z_3 + X_{T1} + Z_2 = 0,00057 + j0,0122 \rightarrow 0,0122[87,3^\circ\text{ohm}$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,0122[87,3^\circ} = 18\,853[-87,3^\circ A$$

Käytettäessä varalla olevaa KL-pumppua oikosulkuvirta on seuraava:

$$Z_{KL-pumppu} = 0,012 + j0,021\text{ohm}$$

Impedanssi 6,3 kV:n keskuksella:

$$Z_{6,3kV} = Z_{R4} + X_{T2} = 0,00054 + j0,00417$$

Kun moottori on käytössä, se on kytketty keskijännitekeskukseen. Nämä molemmat ovat rinnan 6CA-keskuksen syöttöjohtojen ja muuntajan kanssa, eli kokonaisimpedanssi lasketaan seuraavasti:

$$Z_{R5} = Z_{KL-pumppu} || Z_{6kV} = 0,0005 + j0,0032$$

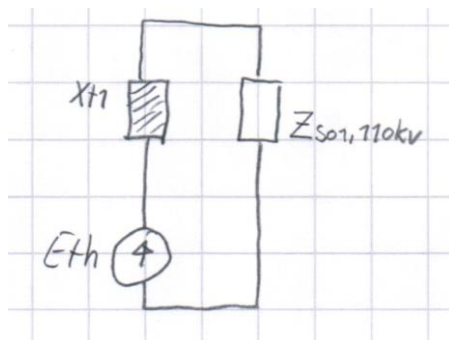
$$Z_{total} = Z_{R5} + Z_3 + X_{T1} = 0,00053 + j0,01122 \rightarrow 0,0112[87,3^\circ \text{ohm}]$$

Oikosulkuvirta:

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,0112[87,3^\circ]} = 20\,536[-87,3^\circ \text{A}]$$

4.2.10 6BA-keskus

6BA on So6:n 6,3 kV:n keskijännitekeskus, josta voidaan ottaa varasyöttö So1:n 6,3 kV:n keskuksiin sekä varalla oleviin KL-pumppuihin. 6BA syöttää myös So6:n 400 V:n keskusta. 6BA saa syöttönsä So6:n omakäyttömuuntajalta 6BT01. Oikosulkupiiri on lähes sama kuin keskuksella 6CA, pois lukien 6CA:n oma muuntaja sekä muuntajan johdotukset (kuva 18).



Kuva 18. Keskuksen oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

6AP-Keskuksen kokonaisimpedanssi 400 V:n redusoituna on laskettu kohdassa 6CA-keskus:

$$Z_{6AP400V} = \frac{1}{Z_{R4}} = \frac{1}{0,00054 + j0,000304} + \frac{1}{0 + j0,0004} = 0,00054 + j0,00017 \text{ ohm} \\ = 0,00057 \angle 17,5^\circ \text{ ohm}$$

Redusoidaan 6,3 kV:n tasoon:

$$Z_{6AP6,3kV} = \left(\frac{6,3}{0,4}\right)^2 * 0,00057 \angle 17,5^\circ = 0,14 \angle 17,5^\circ \rightarrow 0,134 + j0,042 \text{ ohm}$$

Lisätään sarjaan kytketyn muuntajan impedanssi 6,3 kV:n redusoituna:

$$X_{T1400} = 0 + j0,004 \rightarrow 0,004 \angle 90^\circ \text{ ohm}$$

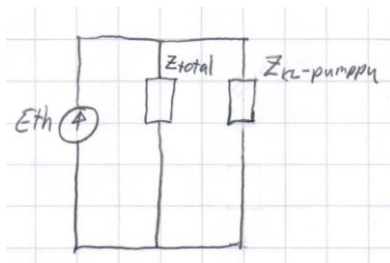
$$X_{T16,3kV} = \left(\frac{6,3}{0,4}\right)^2 * 0,004 \angle 90^\circ = 0,99 \angle 90^\circ \rightarrow 0 + j0,99 \text{ ohm}$$

Kokonaisimpedanssi ja oikosulkuvirran suuruus:

$$Z_{total} = X_{T16,3kV} + Z_{6AP6,3kV} = 0,134 + j1,03 \rightarrow 1 \angle 82,6^\circ \text{ ohm}$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 * 6300}{\sqrt{3} * 1 \angle 82,6^\circ} = 4001 \angle -82,6^\circ \text{ A}$$

Otetaan varalla oleva KL-pumppu mukaan (kuva 19):



Kuva 19. Keskuksen oikosulkupiiri KL-pumpun käytön aikana

$$Z_{KL-pumppu400V} = 0,012 + j0,021 \rightarrow 0,0242 \angle 60,2^\circ \text{ ohm}$$

Redusoidaan 6,3 kV:n jännitteeseen:

$$Z_{KL-pumppu6,3kV} = \left(\frac{0,4}{6,3}\right)^2 * 0,0242 \angle 60,2^\circ = 6 \angle 60,2^\circ \rightarrow 2,97 + j5,21 \text{ ohm}$$

Lasketaan kokonaisimpedanssi ja oikosulkuvirta KL-pumpun kanssa:

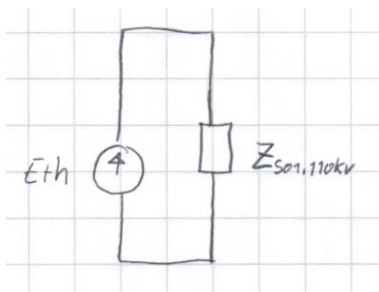
$$\frac{1}{Z_{total2}} = \frac{1}{Z_{total1}} + \frac{1}{Z_{KL-pumppu6,3kV}} = \frac{1}{0,134 + j1,03} + \frac{1}{2,97 + j5,21}$$

$$Z_{total2} = 0,128 + j0,833 \rightarrow 0,84 \angle 81,3^\circ \text{ ohm}$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 * 6300}{\sqrt{3} * 0,84 \angle 81,3^\circ} = 4763,1 \angle -81,3^\circ \text{ A}$$

4.2.11 6AP-keskus

6AP on 10,5 kV:n keskus laitoksessa So6. Tähän kiskoon on liitetty generaattori ja päämuuntaja 110 kV:n kiskoon. Oikosulkupiiriin kuuluu ylläolevien lisäksi So1:n muuntajat ja generaattorit aina 6,3 kV:n moottoreille saakka sekä kaksi yhteyttä Espoon sähköverkkoon (kuva 20).



Kuva 20. Keskukseen oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

6AP-keskuksen impedanssi 400 V:n redusoituna on laskettu kohdassa 6CA:

$$Z_{6AP400V} = Z_{S01,110kV400V} = 0,00054 + j0,00017 \text{ ohm} \rightarrow 0,00057[17,5^\circ \text{ ohm}$$

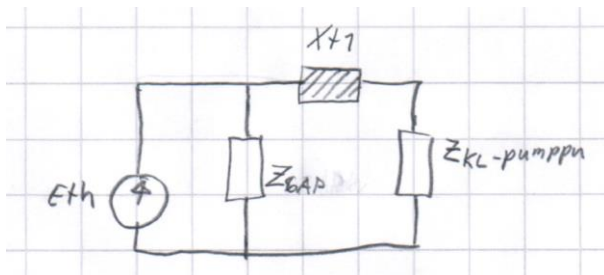
Redusoidaan 10,5 kV:n jännitetasoon:

$$Z_{6AP6,3kV} = Z_{total} = \left(\frac{10,5}{0,4}\right)^2 * 0,00057[17,5^\circ = 0,393[17,5^\circ \text{ ohm}$$

Oikosulkuvirta:

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 * 10500}{\sqrt{3} * 0,393[17,5^\circ} = 16\,968[-17,5^\circ \text{ A}$$

Otetaan varalla oleva KL-pumppu mukaan (kuva 21):



Kuva 21. Keskuksen oikosulkupiiri käytettäessä KL-pumppua

$$X_{T1} = 0 + j2,646 \text{ ohm}, \quad Z_{KL-pumppu} = 8,33 + j14,43 \text{ ohm}, \quad Z_{6AP} = 0,375 + j0,118$$

KL-pumpun ja muuntajan sarjaimpedanssi sekä piirin kokonaisimpedanssi:

$$Z_{S1} = X_{T1} + Z_{KL-pumppu} = 8,33 + j17,076 \text{ ohm}$$

$$\frac{1}{Z_{total}} = \frac{1}{Z_{S1}} + \frac{1}{Z_{6AP}} = \frac{1}{8,33 + j17,076} + \frac{1}{0,375 + j0,118}$$

$$Z_{total} = 0,359 + j0,117 \rightarrow 0,378[18,1^\circ \text{ ohm}$$

Oikosulkuvirta KL-pumpun kanssa:

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 * 10500}{\sqrt{3} * 0,378 \angle 18,1^\circ} = 17\,641,3 \angle -18,1^\circ A$$

4.3 So2:n ja 110kV:n Finno 1-verkon muodostama piiri

Tässä osiossa keskitytään So2:n ja Finno 1-verkon piiriin. Finno 1 on yksi kolmesta 110 kV:n yhteydestä. Edellä mainitut komponentit ovat yhdessä PK2:n avulla ja se pidetään erillään PK1:stä.

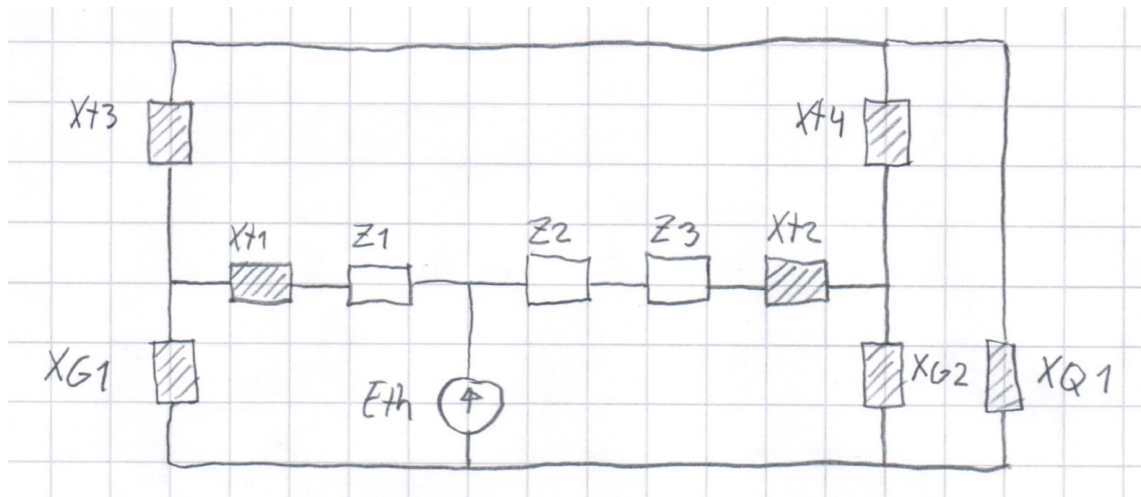
So2:n sisältää kaksi generaattoria joita pyörittävät kaasu- ja höryturbiini. Tehoiltaan So2 pystyy tuottamaan noin 259,2 MVA. Laskettavia keskuksia laitokselta löytyy 6 kpl ja tiettyjä keskuksia pystytään kytkemään yhteen. Oikosulkuvirta lasketaan molempien generaattoreiden ollessa suoraan yhteydessä 10,5 kV:n kiskoon sekä myös ollessa pelkän 180 MVA:n generaattorin omakäyttömuuntajan kautta kytkettynä. Näin saadaan normaaliajon oikosulkuvirta sekä suurin mahdollinen oikosulkuvirta. Generaattoreiden magnetointimuuntajia ei oteta laskuissa huomioon.

4.3.1 2BBA- ja 2BBB-keskukset

2BBA ja 2BBB ovat So2:n keskijännitekiskoja. Ne on kytketty suoraan omakäyttömuuntajien perään. Näiltä kiskostoilta otetaan syöttö laitoksen jokaiseen keskukseen sekä generaattoreille magnetointivirta. Keskukset on yleensä kytketty yhteen, ja syöttö otetaan joko 180 MVA:n generaattorin tai 79,2 MVA:n generaattorin omakäyttömuuntajalta, mutta kiskoille on mahdollista ottaa rinnakkaissyöttö molemmilta generaattoreilta samaan aikaan.

Lasketaan ensin oikosulkuvirta keskusten ollessa yhdessä sekä generaattoreiden syöttäessä kiskostoa rinnakkain:

2BBA- ja 2BBB-keskuksen oikosulkuvirta keskusten saadessa syötön molempien generaattoreiden omakäyttömuuntajien kautta (kuva 22):



Kuva 22. Keskusten oikosulkupiiri syötön tullessa molempien generaattoreiden omakäyttömuuntajan kautta

Taulukko 3. Piirin komponenttien arvot, jossa Z_n =kaapelin-, X_{Tn} =muuntajan-, X_{Gn} =generaattorin- ja X_{Qn} =verkon impedanssi

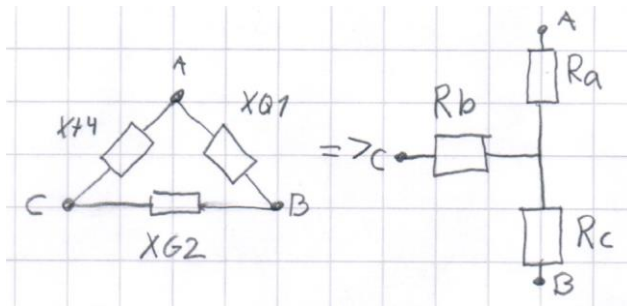
| | Ohm | | | Ohm |
|----------|--------------------|--|----------|--------------|
| Z_1 | $0,0340 + j0,0095$ | | X_{T1} | $0 + j0,882$ |
| Z_2 | $0,0014 + j0,0004$ | | X_{T2} | $0 + j0,882$ |
| Z_3 | $0,0130 + j0,0037$ | | X_{T3} | $0 + j0,073$ |
| | | | X_{T4} | $0 + j0,172$ |
| X_{G1} | $0 + j0,099$ | | | |
| X_{G2} | $0 + j0,171$ | | X_{Q1} | $0 + j0,038$ |

Lasketaan X_{T1} :n ja Z_1 :n sekä Z_2 :n, Z_3 :n ja X_{T2} :n sarjaimpedanssit:

$$Z_{S1} = X_{T1} + Z_1 = 0,034 + j0,892 \text{ ohm}$$

$$Z_{S2} = Z_2 + Z_3 + X_{T2} = 0,0144 + j0,886 \text{ ohm}$$

Tehdään kolmio-tähti-muunnos (kuva 23) impedansseissa X_{T4} , X_{G2} ja X_{Q1} :



Kuva 23. Kolmio-tähti-muunnos

$$R_a = \frac{X_{T4} * X_{Q1}}{X_{G2} + X_{T4} + X_{Q1}}$$

$$R_b = \frac{X_{T4} * X_{G2}}{X_{G2} + X_{T4} + X_{Q1}}$$

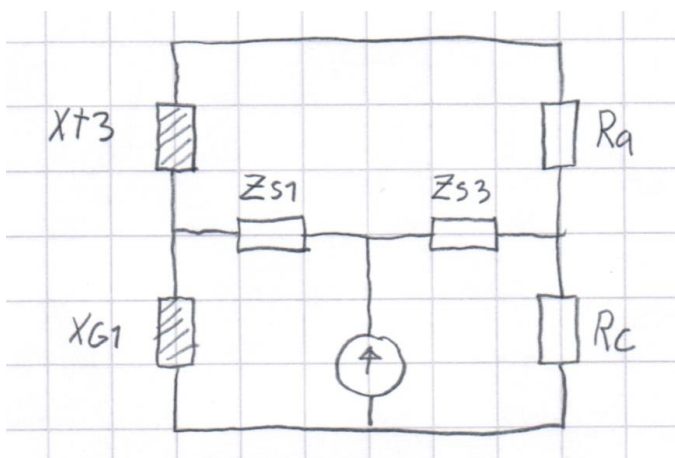
$$R_c = \frac{X_{G2} * X_{Q1}}{X_{G2} + X_{T4} + X_{Q1}}$$

$$R_a = 0,0173[90^\circ \rightarrow 0 + j0,0173\text{ohm}, \quad R_b = 0,078[90^\circ \rightarrow 0 + j0,078\text{ohm},$$

$$R_c = 0,017[90^\circ \rightarrow 0 + j0,017\text{ohm}$$

Sarjassa olevien Z_{S2} :N sekä R_b :n sarjaaimpedanssi. Sarjaaimpedanssin ratkaisun jälkeen oikosulkupiiri näyttää seuraavalta (kuva 24):

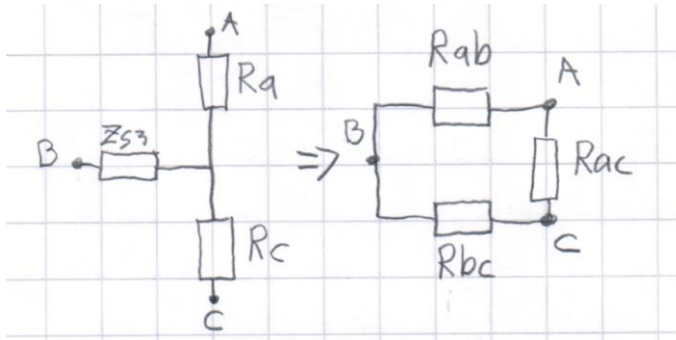
$$Z_{S3} = Z_{S2} + R_b = 0,0144 + j0,886 + 0 + j0,078 = 0,0144 + j0,964 \rightarrow 0,964[89^\circ\text{ohm}$$



Kuva 24. Oikosulkupiirin kytkentä muutosten jälkeen

Tehdään tähti-kolmio-muunnos impedansseissa X_{T3} , X_{G1} ja Z_{S1} (kuva 26) sekä Z_{S3} , R_a ja R_c (kuva 25):

Z_{S3} , R_a ja R_c :



Kuva 25. Tähti-kolmio-muunnos

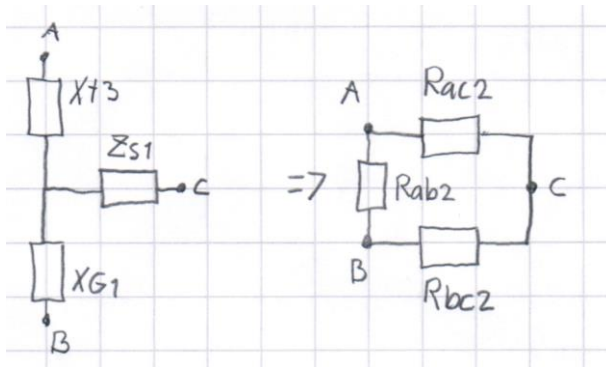
$$R_{ab} = R_a + Z_{S3} + \frac{R_a * Z_{S3}}{R_c}$$

$$R_{bc} = R_c + Z_{S3} + \frac{R_c * Z_{S3}}{R_a}$$

$$R_{ac} = R_a + R_c + \frac{R_a * R_c}{Z_{S3}}$$

$$R_{ab} = 0,031 + j1,914ohm, \quad R_{bc} = 0,031 + j1,929ohm, \quad R_{ac} = 0 + j0,0346ohm$$

X_{T3} , X_{G1} ja Z_{S1} :



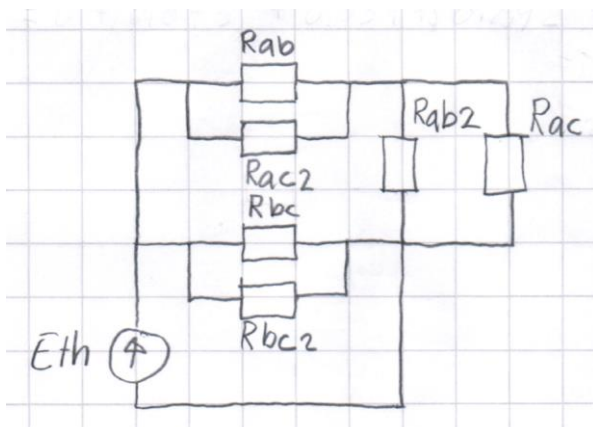
Kuva 26. Tähti-kolmio-muunnos

$$R_{ab2} = X_{T3} + X_{G1} + \frac{X_{T3} * X_{G1}}{Z_{S1}}$$

$$R_{bc2} = X_{G1} + Z_{S1} + \frac{X_{G1} * Z_{S1}}{X_{T3}}$$

$$R_{ac2} = X_{T3} + Z_{S1} + \frac{X_{T3} * Z_{S1}}{X_{G1}}$$

$$R_{ab2} = 0 + j0,18\text{ohm}, \quad R_{bc2} = 0,054 + j2,2\text{ohm}, \quad R_{ac2} = 0,045 + j1,621\text{ohm}$$



Kuva 27. Oikosulkupiiri kahden tähti-kolmio-muunnoksen jälkeen

Lasketaan kolme rinnakkaisimpedanssia (kuva 27) R_{ab} ja R_{ac2} , R_{ab2} ja R_{ac} sekä R_{bc} ja R_{bc2} :

$$\frac{1}{Z_{R1}} = \frac{1}{R_{ab}} + \frac{1}{R_{ac2}} = \frac{1}{0,031 + j1,914} + \frac{1}{0,045 + j1,621}$$

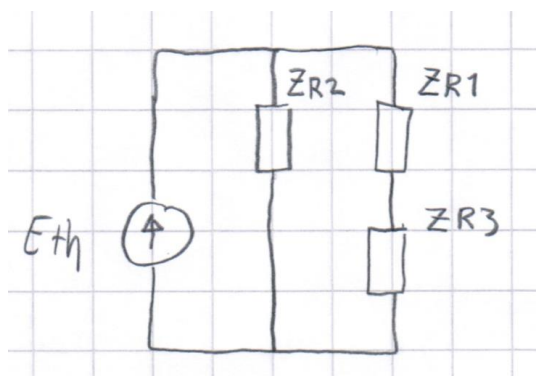
$$Z_{R1} = 0,018 + j0,878 \text{ ohm}$$

$$\frac{1}{Z_{R2}} = \frac{1}{R_{bc}} + \frac{1}{R_{bc2}} = \frac{1}{0,031 + j1,929} + \frac{1}{0,054 + j2,2}$$

$$Z_{R2} = 0,0197 + j1,028 \text{ ohm}$$

$$\frac{1}{Z_{R3}} = \frac{1}{R_{ab2}} + \frac{1}{R_{ac}} = \frac{1}{0 + j0,18} + \frac{1}{0 + j0,0346}$$

$$Z_{R3} = 0 + j0,029 \text{ ohm}$$



Kuva 28. Oikosulkupiiri impedanssien yhteenlaskun jälkeen

Lasketaan sarjaimpedanssi (kuva 28):

$$Z_{S4} = Z_{R1} + Z_{R3} = 0,018 + j0,907 \text{ ohm}$$

Lasketaan komponenttien rinnan- eli piirin kokonaisimpedanssi:

$$\frac{1}{Z_{total}} = \frac{1}{Z_{R2}} + \frac{1}{Z_{S4}} = \frac{1}{0,0197 + j1,028} + \frac{1}{0,018 + j0,907}$$

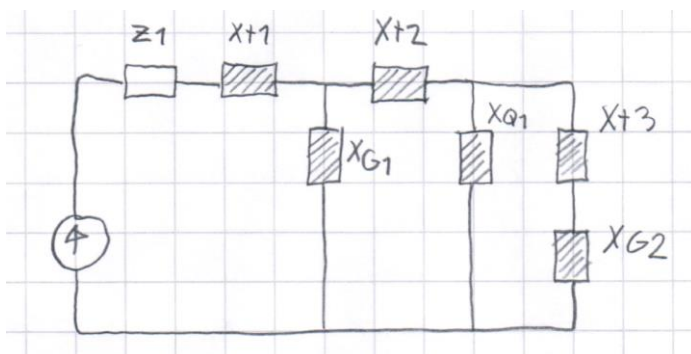
$$Z_{total} = 0,0094 + j0,482 \rightarrow 0,482 \angle 88,9^\circ \text{ ohm}$$

Keskuksen oikosulkuvirta:

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 * 10500}{\sqrt{3} * 0,482 \angle 88,9^\circ} = 13\,835 \angle -88,9^\circ \text{ A}$$

2BBA-keskus syötön tullessa vain yhdeltä omakäyttömuuntajalta 2BBT10

Oikosulkuvirta keskuksella 2BBA keskuksen saadessa syöttönsä vain yhden omakäyttömuuntajan 2BBT10 kautta sekä keskusten 2BBA ja 2BBB ollessa erillään (kuva 29):



Kuva 29. Keskuksen 2BBA oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

Generaattorin ja muuntajan sarjaimpedanssi sekä lisätään näiden rinnalla oleva Finno 1-verkko:

$$Z_{S1} = X_{T3} + X_{G2} = 0 + j0,343\text{ohm}$$

$$\frac{1}{Z_{R1}} + \frac{1}{Z_{S1}} + \frac{1}{X_{Q1}} = \frac{1}{0 + j0,343} + \frac{1}{0 + j0,038}$$

$$Z_{R1} = 0 + j0,0342\text{ohm}$$

Lisätään muuntajan 2BAT10 sarjaimpedanssi ja rinnalla oleva 180MVA:n generaattori:

$$Z_{S2} = Z_{R1} + X_{T2} = 0 + j0,1072\text{ohm}$$

$$\frac{1}{Z_{R2}} + \frac{1}{Z_{S2}} + \frac{1}{X_{G1}} = \frac{1}{0 + j0,1072} + \frac{1}{0 + j0,099}$$

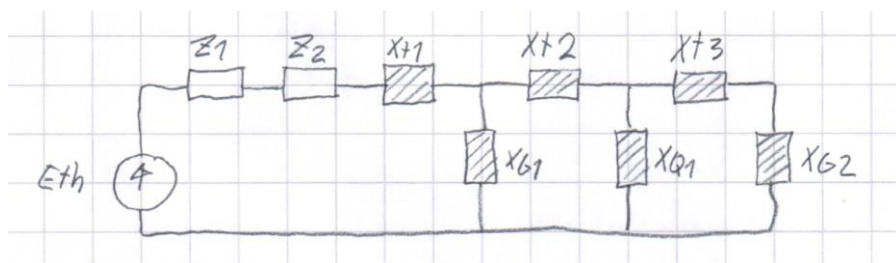
$$Z_{R2} = 0 + j0,0515\text{ohm}$$

Piirin kokonaisimpedanssi sekä oikosulkuvirta:

$$Z_{total} = Z_1 + X_{T1} + Z_{R2} = 0,034 + j0,943 \rightarrow 0,944[88^\circ\text{ohm}$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 * 10500}{\sqrt{3} * 0,944[88^\circ} = 7\,064[-88^\circ\text{A}$$

2BBB-keskus syötön tullessa vain yhdeltä omakäyttömuuntajalta 2BBT10 (kuva 30):



Kuva 30. Keskuksen oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

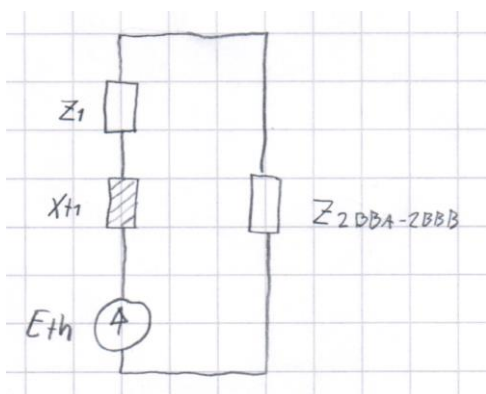
2BBB:lla on sama oikosulkuvirta kuin keskuksella 2BBA:lla, sillä erona näissä piireissä on vain keskusten välinen lyhyt kaapeli Z_1 , joka ei nosta kokonaisimpedanssia merkittävästi:

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 * 10500}{\sqrt{3} * 0,944 \angle 88^\circ} = 7\,064 \angle -88^\circ A$$

4.3.2 2BFC-keskus

2BFC on 690V:n keskus, joka syöttää merivesipumppaamoja. Keskukselle tulee pitkä syöttöjohto, joka tulee huomioida laskuissa. Keskus saa syöttönsä 2BBA:lta, eli oikosulkuvirran suuruuteen vaikuttaa se, miten kyseistä kiskoa syötetään.

Lasketaan ensin oikosulkuvirta 2BBA saadessa syötön kahdelta omakäyttömuuntajalta, 2BBT10:lta sekä 2BBT20:lta (kuva 31):



Kuva 31. Oikosulkupiiri syöttävän kiskoja 2BBA ja 2BBB ollessa yhdessä ja syötön tulevan molemmilta omakäyttömuuntajilta

$$Z_1 = 0,00009 + j0,00005 \text{ ohm}, \quad X_{T1} = 0 + j0,0143 \text{ ohm},$$

$$Z_{2BBA-2BBB10,5kV} = 0,0094 + j0,482 \rightarrow 0,482 \angle 88,9^\circ \text{ ohm}$$

Redusoidaan $Z_{2BBA-2BBB10,5kV}$ 690 V:lle:

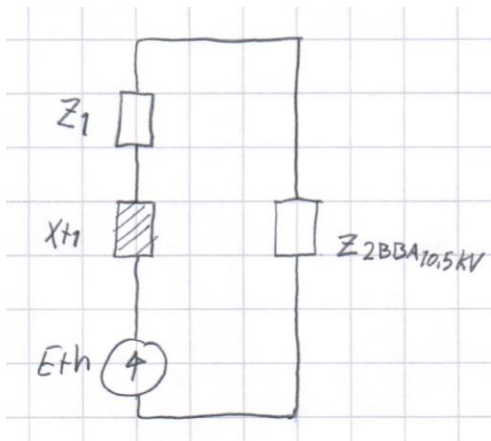
$$Z_{2BBA-2BBB690V} = \left(\frac{0,69}{10,5}\right)^2 * 0,482[88,9^\circ = 0,0021[88,9^\circ \rightarrow 0,00004 + j0,0021ohm$$

Kokonaisimpedanssi sekä oikosulkuvirta:

$$Z_{total} = Z_1 + X_{T1} + Z_{2BBA-2BBB690V} = 0,00013 + j0,01645 \rightarrow 0,016[89,5^\circ ohm$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,05 * 690}{\sqrt{3} * 0,016[89,5^\circ} = 26\,143[-89,5^\circ A$$

Oikosulkuvirta keskusten 2BBA ja 2BBB ollessa erikseen ja syötön tullessa yhdeltä omakäyttömuuntajalta 2BBT10:ltä (kuva 32):



Kuva 32. Keskuksen oikosulkupiiri keskuksen saadessa syötön pelkän 2BBA:n kautta

$$Z_1 = 0,00009 + j0,00005ohm, \quad X_{T1} = 0 + j0,0143ohm,$$

$$Z_{2BBA-2BBB10,5kV} = 0,034 + j0,943 \rightarrow 0,944[88^\circ ohm$$

Redusoidaan $Z_{2BBA-2BBB10,5kV}$ 690 V:lle:

$$Z_{2BBA690V} = \left(\frac{0,69}{10,5}\right)^2 * 0,944[88^\circ = 0,0041[88^\circ \rightarrow 0,00014 + j0,0041ohm$$

Kokonaisimpedanssi sekä oikosulkuvirta:

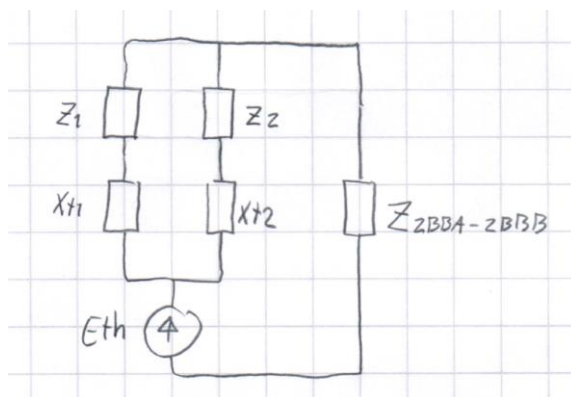
$$Z_{total} = Z_1 + X_{T1} + Z_{2BBA690V} = 0,00023 + j0,0101845 \rightarrow 0,0185[89,3^\circ ohm$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,05 * 690}{\sqrt{3} * 0,0185[89,3^\circ} = 22\,610[-89,3^\circ A$$

4.3.3 2BHA- ja 2BHB-keskukset

2BHA ja 2BHB toimivat So2:n 400 V:n omakäyttösähkökeskuksina. Keskukset saavat syöttönsä omilta, saman kokoisilta muuntajilta sekä eri kiskoilta. Laskennoissa tulee ottaa huomioon, että keskukset sekä syöttökiskot voidaan kytkeä yhteen. Myös yhteisellä syöttökiskolle voidaan tuoda sähkö kahdelta omakäyttömuuntajalta. Näin oikosulkuvirrassa voi tulla isoja eroja.

Lasketaan ensin oikosulkuvirta keskusten ja syöttökiskojen ollessa yhdessä sekä syötön tullessa kahdelta omakäyttömuuntajalta (kuva 33):



Kuva 33. Oikosulkupiiri keskusten ja syöttökiskojen ollessa yhdessä sekä syötön tullessa kahdelta omakäyttömuuntajalta

$$X_{T1}, X_{T2} = 0 + j0,006 ohm, \quad Z_1, Z_2 = 0,000005 + j0,000003 ohm,$$

$$Z_{2BBA-2BBB10,5kV} = 0,0094 + j0,482 \rightarrow 0,482[88,9^\circ ohm$$

Lasketaan sarjaimpedanssit Z_1 ja X_{T1} , Z_2 ja X_{T2} sekä näiden rinnanimpedanssi:

$$Z_{S1} = X_{T1} + Z_1 = 0,000005 + j0,006 ohm$$

$$Z_{S2} = X_{T2} + Z_2 = 0,000005 + j0,006\text{ohm}$$

$$Z_{R1} = Z_{S1} || Z_{S2} = 0,0000025 + j0,003\text{ohm}$$

Redusoidaan $Z_{2BBA-2BBB10,5kV}$ 400 V:lle:

$$Z_{2BBA-2BBB400V} = \left(\frac{0,4}{10,5}\right)^2 * 0,482[88,9^\circ = 0,0007[88,9^\circ \rightarrow 0,000013 + j0,0007\text{ohm}$$

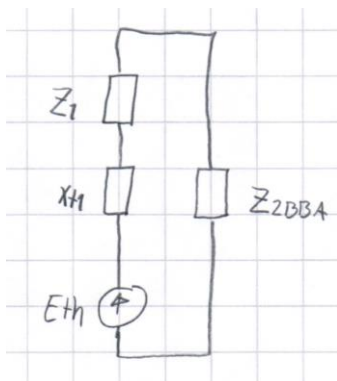
Kokonaisimpedanssi sekä oikosulkuvirta:

$$Z_{total} = Z_{2BBA-2BBB400V} + Z_{R1} = 0,000016 + j0,0037 \rightarrow 0,0037[89,8^\circ\text{ohm}$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,0037[89,8^\circ} = 62\,416[-89,8^\circ A$$

Lasketaan keskusten oikosulkuvirta niiden ollessa erikseen sekä syötön tullessa vain yhden omakäyttömuuntajan 2BBT10:n kautta (kuva 34):

2BHA:



Kuva 34. Keskusten oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

$$Z_1 = 0,000005 + j0,000003\text{ohm}, \quad X_{T1} = 0 + j0,006\text{ohm},$$

$$Z_{2BBA10,5kV} = 0,944[88^\circ\text{ohm}$$

Redusoidaan $Z_{2BBA10,5kv}$ 400 V:lle:

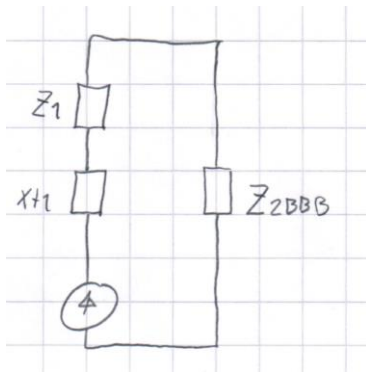
$$Z_{2BBA400V} = \left(\frac{0,4}{10,5}\right)^2 * 0,944[88^\circ = 0,00137[88^\circ \rightarrow 0,00005 + j0,00137\text{ohm}$$

Kokonaisimpedanssi sekä oikosulkuvirta:

$$Z_{total} = Z_{2BBA400V} + Z_1 + X_{T1} = 0,000055 + j0,007373 \rightarrow 0,0074[89,6^\circ\text{ohm}$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,0074[89,6^\circ} = 31\,208[-89,6^\circ A$$

2BHB (kuva 35):



Kuva 35. Keskusten oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

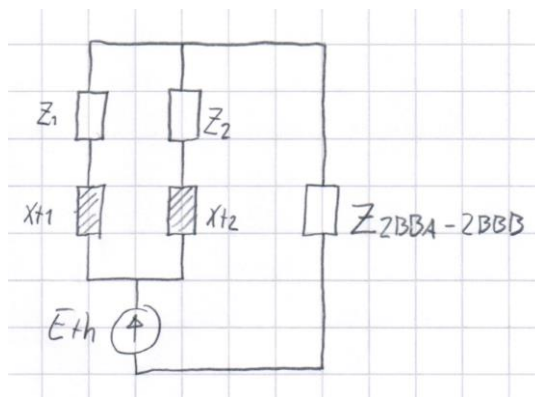
Keskuksella laskettu oikosulkuvirta on sama kuin 2BHA:lla, sillä keskusten kokonaisimpedanssilla ei ole muuta eroa kuin keskusten 2BBA ja 2BBB välinen lyhyt kaapeli joka ei vaikuta kokonaisimpedanssiin merkittävästi.

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 * 400}{\sqrt{3} * 0,0074[89,6^\circ} = 31\,208[-89,6^\circ A$$

4.3.4 2BFA- ja 2BFB-keskukset

2BFA ja 2BFB ovat So2:n 690 V:n sähkökeskuksia jotka syöttävät taajuusmuuttajia. Keskukset saavat syöttönsä omilta, saman kokoisilta muuntajilta sekä eri kiskoilta. Laskennoissa tulee ottaa huomioon, että keskukset sekä syöttökiskot voidaan kytkeä yhteen. Myös yhteiselle syöttökiskolle voidaan tuoda sähkö kahdelta omakäyttömuuntajalta. Näin oikosulkuvirtoihin voi tulla isoja eroja.

Lasketaan ensin oikosulkuvirta keskusten ja syöttökiskojen ollessa yhdessä sekä syötön tullessa kahdelta omakäyttömuuntajalta (kuva 36):



Kuva 36. Keskuksen oikosulkupiiri keskusten ja syöttökiskojen ollessa yhdessä sekä syötön tullessa kahdelta omakäyttömuuntajalta

$$Z_1, Z_2 = 0,000018 + j0,00001 \text{ ohm}, \quad X_{T1}, X_{T2} = 0 + j0,0114 \text{ ohm},$$

$$Z_{2BBA-2BBB10,5kV} = 0,0094 + j0,482 \rightarrow 0,482[88,9^\circ \text{ ohm}$$

Redusoidaan $Z_{2BBA-2BBB10,5kV}$ 690V:lle:

$$Z_{2BBA-2BBB690V} = \left(\frac{0,69}{10,5}\right)^2 * 0,482[88,9^\circ = 0,0021[88,9^\circ \rightarrow 0,00004 + j0,0021 \text{ ohm}$$

Lasketaan sarjaimpedanssit Z_1 , X_{T1} ja Z_2 , X_{T2} sekä niiden rinnanimpedanssi:

$$Z_{S1} = Z_1 + X_{T1} = 0,000018 + j0,01141\text{ohm}$$

$$Z_{S2} = Z_2 + X_{T2} = 0,000018 + j0,01141\text{ohm}$$

$$Z_{R1} = Z_{S1} || Z_{S2} = 0,000009 + j0,005705\text{ohm}$$

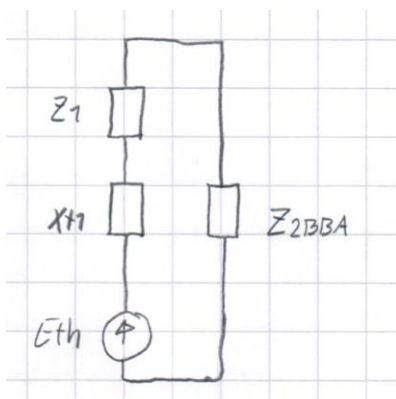
Kokonaisimpedanssi sekä oikosulkuvirta:

$$Z_{total} = Z_{2BBA-2BBB690V} + Z_{R1} = 0,00005 + j0,00781 \rightarrow 0,00781 \angle 89,6^\circ \text{ohm}$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,05 * 690}{\sqrt{3} * 0,00781 \angle 89,6^\circ} = 53\,558,3 \angle -89,6^\circ \text{A}$$

Lasketaan keskusten oikosulkuvirta niiden ollessa erikseen sekä syötön tullessa vain yhden omakäyttömuuntajan 2BBT10:n kautta (kuva 37):

2BFA:



Kuva 37. Keskusten oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

$$Z_1 = 0,000018 + j0,00001\text{ohm}, \quad X_{T1} = 0 + j0,0114\text{ohm},$$

$$Z_{2BBA10,5kv} = 0,944 \angle 88^\circ \text{ohm}$$

Redusoidaan $Z_{2BBA10,5kv}$ 690 V:lle

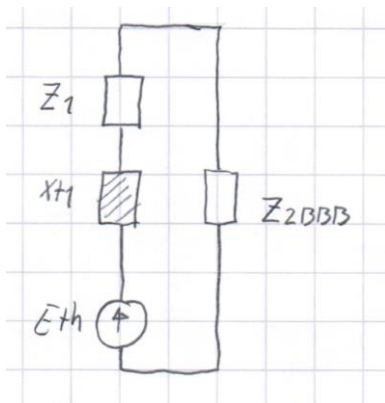
$$Z_{2BBA690V} = \left(\frac{0,69}{10,5}\right)^2 * 0,944 \angle 88^\circ = 0,0041 \angle 88^\circ \rightarrow 0,00014 + j0,0041 \text{ ohm}$$

Kokonaisimpedanssi ja oikosulkuvirta:

$$Z_{total} = Z_{2BBA690V} + Z_1 + X_{T1} = 0,000158 + j0,01551 \rightarrow 0,01551 \angle 89,4^\circ \text{ ohm}$$

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,05 * 690}{\sqrt{3} * 0,01551 \angle 89,4^\circ} = 26\,969 \angle -89,4^\circ \text{ A}$$

2BFB (kuva 38):



Kuva 38. Keskusten oikosulkupiiri Thevenin menetelmällä

Keskuksella laskettu oikosulkuvirta on sama kuin 2BFA:lla, sillä keskusten kokonaisimpedanssilla ei ole muuta eroa kuin keskusten 2BBA ja 2BBB välinen lyhyt kaapeli, joka ei vaikuta kokonaisimpedanssiin merkittävästi.

$$I_K = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,05 * 690}{\sqrt{3} * 0,01551 \angle 89,4^\circ} = 26\,969 \angle -89,4^\circ \text{ A}$$

5 Työmaadoitusten määrittäminen keskuksille 1AJ, 1BA ja 1BB

Työmaadoituksen tarkoitus on maadoittaa kohde ja estää vaarallisen jännitteen syntyminen operoitavaan komponenttiin.

Suurjännitelaitteistoissa kaikki osat, joissa työskennellään pitää työmaadoittaa (maadoittaa ja oikosulkea). Työmaadoituslaitteet pitää kytkeä ensin maadoituspisteeseen ja sen jälkeen maadoitettaviin osiin. Työmaadoituslaitteiden pitää olla aina kun mahdollista nähtävissä työpisteestä. Muulloin työmaadoitus pitää asentaa niin lähelle työkohdetta kuin kohtuudella on mahdollista. [10, s. 65.]

Siirrettäviä työmaadoituksia koskee myös standardi SFS-EN-61230.

Työmaadoitukset voidaan kytkeä myös rinnan, jos keskuksen oikosulkuvirta ylittää yhden maadoituksen virrankestävyysarvon: Tällöin tulee ottaa huomioon seuraavat vaatimukset:

Jos virrankestävyyden takia kaksi siirrettävää työmaadoitusvälinettä joudutaan kytkemään rinnan, on otettava huomioon seuraavat vaatimukset [10, s. 66]:

- Johtimen poikkipinnan, pituuden ja liitäntäosien on oltava samanlaisia molemmissa välineissä.
- Samaan johtimeen tulevat maadoituskiinnikkeet tai kiinnityskohdat saavat olla enintään 100mm etäisyydellä toisistaan.
- Sallittu virta on enintään 1,6 kertaa yhden välineen kestävyys.

Keskuksella 1AJ oikosulkuvirta on 13 095A katkaisijoiden 1AJ02 ja 1AJ05 ollessa auki sekä syötön tullessa kahdelta linjamuuntajalta. Tässä tapauksessa työmaadoituksen virrankesto täytyy olla vähintään kaksinkertainen sekunnin ajan ja suurempi kuin 13 095 oikosulun kestäessä pidempää.

Keskuksella 1BA ja 1BB oikosulkuvirta on 32 266A silloin, kun se on erotettu 20kV:n kiskostosta ja kun keskus saa syöttönsä So6:n ja So1:n generaattoreilta sekä Finno 3:lta ja Niittykummulta. Tässä tapauksessa työmaadoituksen virrankesto täytyy olla vähintään kaksinkertainen sekunnin ajan ja suurempi kuin 32 266A oikosulun kestäessä pidempää.

Monen työmaadoituksen virrankestävyys jää alle 25kA:n suuruuteen, joten suositellaan käytettäväksi kahta työmaadoitusta rinnan. Tällä tavalla 25kA:n virrankestosta saadaan seuraava:

$$I_{K2} = I_{K1} * 1,6 = 25kA * 1,6 = 40kA$$

Lähteet

- 1 http://www.tem.fi/files/34657/FORTUM_Karhapaa.pdf
- 2 <http://www.fortum.com/fi/konserni/fortum-lyhyesti/pages/default.aspx>
- 3 http://fortum.com/Lists/ArchiveLibraryList/Capital%20Markets%20Day%202010/CMD2010_Suomenoja_sitevisit_Savikoski.pdf
- 4 Lämpövoimaproessit, s. 115, Ralf Wikstén, Otatieto 572
- 5 Huotari, K. & Partanen, J. 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. LTTK, Sähkötekniikan osasto.
- 6 Väisänen, H. 2013. Naistenlahden voimalaitosverkon oikosulkuarvojen tarkastelu. TAKK, Sähkövoimatekniikka
- 7 <http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/hbase/electric/impcom.html#c1>
- 8 Wikipedia. [Viitattu 19.3.2014] Saatavilla [www-muodossa: <URL: http://fi.wikipedia.org/wiki/Generaattori>](http://fi.wikipedia.org/wiki/Generaattori).
- 9 Wikipedia. [Viitattu 19.3.2014] Saatavilla [www-muodossa: <URL: http://fi.wikipedia.org/wiki/T%C3%A4hti-kolmiomuunnos](http://fi.wikipedia.org/wiki/T%C3%A4hti-kolmiomuunnos)
- 10 SFS-Käsikirja 600-2, 2012. Sädökset, sähkötyöturvallisuus, erityisasennukset ja liittyvät standardit.

Muuntajat:

| Muuntajat | | | | |
|-----------|--------|----------|------------|--------|
| | | | | |
| 1. Laitos | | Sk [Kva] | Un [kV] | uk [%] |
| | 1AT01 | 100000 | 118/10,5 | 5 |
| | 1BT01 | 16000 | 10,5/6,3 | 10 |
| | 1CT06 | 1600 | 6/0,4 | 5,8 |
| | 1CT02 | 1600 | 6/0,4 | 5,5 |
| | 1CT01 | 1600 | 6/0,4 | 5,6 |
| | 1CT03 | 1600 | 6/0,4 | 5,7 |
| | 1CT04 | 1600 | 6/0,4 | 5,6 |
| | 1CT05 | 1600 | 20/0,4 | 6 |
| | 1CT07 | 1000 | 20/0,4 | 5,4 |
| | | | | |
| 2. Laitos | | | | |
| | 2BAT10 | 190000 | 120/10,5 | 12,5 |
| | 2BAT20 | 80000 | 120/10,5 | 12,5 |
| | 2BBT10 | 10000 | 15,57/10,5 | 8 |
| | 2BBT20 | 10000 | 10,5/10,5 | 8 |
| | 2BHT10 | 1600 | 10,5/0,4 | 6 |
| | 2BHT20 | 1600 | 10,5/0,4 | 6 |
| | 2BFT10 | 2500 | 10,5/0,69 | 6 |
| | 2BFT20 | 2500 | 10,5/0,69 | 6 |
| | 2BFT30 | 2000 | 10,5/0,69 | 6 |
| | | | | |
| 3. Ja 8. | | | | |
| | 3BT02 | 5 | 20/6,3 | 7,2 |
| | 3CT11 | 630 | 6,3/0,66 | 5,8 |
| | 3CT10 | 2 | 6,3/0,3 | 5,9 |
| | 8CT08 | 2500 | 6,3/0,4 | 8 |
| | | | | |
| 6. Laitos | | | | |
| | 6AT01 | 50000 | 120/10,5 | 8 |
| | 6BT01 | 2500 | 10,5/6,3 | 6 |
| | 6CT01 | 1200 | 6,3/0,4 | 6 |
| | 6CT02 | 630 | 6,3/0,65 | 5 |

Generaattorit

Generaattoreiden, joita käytettiin työssä, nimellisarvot. Varavoimakoneita ei otettu laskuissa mukaan:

| Generaattorit | | | | | | | |
|-----------------|--------|----------|---------|-------|-------------|------------------|--|
| | | | | | | | |
| | | Sn [MVA] | Un [kV] | xd | xd" | Oikosulkumittaus | |
| | 1SP01 | 102 | 10,5 | 2,69 | 0,215 | - | |
| Steam | 2MKA20 | 79,2 | 10,5 | 2,04 | 0,124 | - | |
| Gas | 2MKA10 | 180 | 15,75 | 2,176 | 0,161 | - | |
| | 6QP10 | 47 | 10,5 | 2,01 | 0,12 | - | |
| | | | | | | | |
| Varavoimakoneet | | | | | | | |
| Disel | 1EY10 | 0,28 | 400/230 | | | 1600A | |
| diesel | 2XKA10 | 0,5 | 400/230 | | cos phi 0,8 | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Epätahtimoottorit

Epätahtimoottoreiden, joita käytettiin työssä, nimellisarvot:

| Moottorit | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|-------|-------|---------|--|--|
| | | | | | | | |
| 1. Ja 3. | | Potto [kw] | U [V] | I [A] | cos phi | | |
| Syvepumppu | 1RL01D001 | 3500 | 6000 | 394 | 0,89 | | |
| | 1RL02D001 | 3500 | 6000 | 394 | 0,89 | | |
| Palamisilma | 1NG01D001 | 600 | 6000 | 70 | 0,87 | | |
| | 1NG02D001 | 600 | 6000 | 70 | 0,87 | | |
| Kaukolämpö | 1UN12D001 | 800 | 6000 | 92 | 0,88 | | |
| | 1UN09D001 | 800 | 6000 | 92 | 0,88 | | |
| | 1UN30D001 | 800 | 6000 | 92 | 0,88 | | |
| | 1UN81D001 | 800 | 6000 | 92 | 0,87 | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 6. Laitos | | | | | | | |
| Kaukolämpö | 6UN10D002 | 500 | 6300 | 542 | 0,84 | | |
| | 6UN10D001 | 500 | 660 | 542 | 0,84 | | |
| | | | | | | | |
| 6. Kaukolämpöpumput varalla, normaalisti käytetään So2:n KL moottoreita. | | | | | | | |
| Laskennassa käytetään cos phi:n vian aikaista 0,5 arvoa. | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Kaapelit

Kaapeleiden, joita käytettiin työssä, pituudet:

| Kaapelit | | | | | |
|-----------|-----|-------------------------------------|--------------------|--------|----------|
| 6. Laitos | | Väli | Kaapeli | Pituus | |
| | 6A | 6AT01 - 6AP | AMXCMK 3X4X800 | 7m | |
| | 6B | 6BT01 - 6BA | AHXAMK 3X300 | 4m | |
| | 6C | 6BA - 6CT01 | AHXAMK 3X185 | 46m | |
| 1. Laitos | | | | | |
| | 1A | 1BT01 - 1BB01/1BA02 | APYAKMM 5X3X300 | 46m | |
| | 1B | 1BB02/1BA03 - CT06 | APAKM 3X185 | 196m | |
| | 1C | 1BA05 - 1RL01D001 (Syvepumppu 1) | APAKM 2X3X185 | 45m | |
| | 1D | 1BB04 - 1RL02D001 (Syvepumppu 2) | APAKM 2X3X185 | 35m | |
| | 1E | 1BA06 - 1NG01D001 (Palamisilma 1) | APAKM 3X185 | 81m | |
| | 1F | 1BB05 - 1NG02D001 (Palamisilma 2) | APAKM 3X185 | 90m | |
| | 1G | 1BB06 - 1CT02 | APAKM 3X185 | 14m | |
| | 1H | 1BA07 - 1CT01 | APAKM 3X185 | 14m | |
| | 1I | 1BB07 - 1CT03 | APAKM 3X185 | 11m | |
| | 1J | 1BA08 - 1CT04 | APAKM 3X185 | 11m | |
| | 1K | 1BA09 - 1UN09D001 (KL-Pumppu) | APAKM 3X185 | 40m | |
| | 1L | 1BB08 - 1UN12D001 (KL-Pumppu) | APAKM 3X185 | 36m | |
| | 1M | 1BA10 - 1UN30D001 (KL-Pumppu) | APAKM 3X185 | 44m | |
| | 1N | 1BB09 - 3BC01 | AHXCMKM 2X3X300 | 85m | |
| | 1O | 1BA11 - 8CT08 | AHXCMKM 3X300 | 190m | |
| | 1P | 1CT05 - 1CN | APYAKMM 3X120 | 2m | |
| | 1Q | 1CT07 - 1CD | APYAKMM 3X120 | 3m | |
| | 1Q1 | 1AJ03 - 1CT07 | APYAKMM 3X120 | 280m | |
| 3. Laitos | | | | | |
| | 3A | 3BC04 - 1UN81D001 (KL-Pumppu) | APYAKMM 3X185 | 105m | |
| | 3B | 3BC05 - 3CT10 | APYAKMM 3X300 | 15m | |
| | 3C | 3BC06 - 3BT02 | AHXCMKM 2X3X300 | 14m | |
| | 3D | 3BT02 - 1AJ05 | APYAKMM 3X120 | 142m | |
| 2. Laitos | | | | | |
| | 2A | 2BBT10 - 2BBA01 | AI 3X(1X500)+35 | 168m | AXQJ-F |
| | 2B | 2BBA05 - 2BHT10 | AL 3X(1X185)+35 Cu | 23m | AHXAMK-W |
| | 2C | 2BBA06 - 2BFT10 | AL 3X(1X185)+35 Cu | 25m | |
| | 2D | 2BBA07 - 2BFT30 (Merivesipumppaamo) | AL 3X(1X185)+35 Cu | 131m | |
| | 2E | 2BBA02 - 2BBB02 | AI 3X(1X500)+35 | 7m | |
| | 2F | 2BBB03 - 2BHT20 | AL 3X(1X185)+35 Cu | 23m | |
| | 2G | 2BBB04 - 2BFT20 | AL 3X(1X185)+35 Cu | 25m | |
| | 2H | 2BBT20 - 2BBB01 | AI 3X(1X500)+35 | 66m | |

Kaapeleiden ominaisimpedanssi

Työssä käytettyjen kaapeleiden ominaisimpedanssit:

| Kaapeleiden ominaisimpedanssit | | | |
|--------------------------------|----------|-------|-------|
| | Koko | R/Km | X/Km |
| AMXCMK | 4X800 | 0,03 | 0,057 |
| | | | |
| AHXAMK-W | 3X300 | 0,104 | 0,068 |
| | 3X185 | 0,164 | 0,09 |
| | | | |
| AHXCMMK | 3X300 | 0,104 | 0,066 |
| | | | |
| APYAKMM | 3X300 | 0,113 | 0,09 |
| | 3X185 | 0,189 | 0,107 |
| | 3X120 | 0,283 | 0,115 |
| | | | |
| APAKM | 3X185 | 0,17 | 0,073 |
| | | | |
| AXQJ-F (al 1x500) | 1X500/35 | 0,6 | 0,17 |

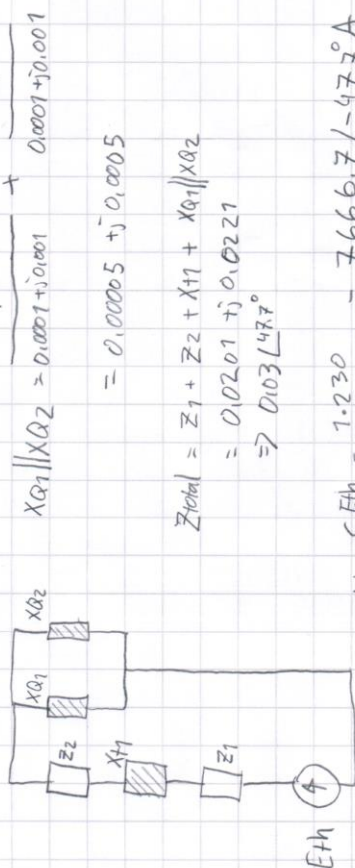
Lista keskusten oikosulkuarvoista

Kaikki työssä lasketut oikosulkuvirrat:

| | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|------------|--|--|
| Oikosulkuvirrat | | | | | |
| | | | | | |
| | Keskus | Ik1 [A]* | Ik2 [A] ** | | |
| So1, So3, So8 ja So6 | | | | | |
| | 1CD | 7 419 | 7 666,7 | | |
| | 1AJ | 7 258 | 13 095 | | |
| | 3CU | 44 231 | | | |
| | 3BC | 32 800 | | | |
| | 1CN | 37 097 | 68 657 | | |
| | 8CA | 40 351 | | | |
| | 1CH | 37 097 | 68 657 | | |
| | 1CG | 37 097 | 68 657 | | |
| | 1CA | 37 705 | 69 697 | | |
| | 1CB | 37 705 | 69 697 | | |
| | 1CC | 35 938 | | | |
| | 1BA-1BB | 32 266 | | | |
| | 6CA | 18 853 | 20 536 | | |
| | 6BA | 4 001 | 4 763,1 | | |
| | 6AP | 16 968 | 17 641,3 | | |
| | | | | | |
| So2 | | | | | |
| | 2BBA | 7 064 | 13 835 | | |
| | 2BBB | 7 064 | 13 835 | | |
| | 2BFC | 22 610 | 26 143 | | |
| | 2BHA | 31 208 | 62 416 | | |
| | 2BHB | 31 208 | 62 416 | | |
| | 2BFA | 26 969 | 53 558,3 | | |
| | 2BFB | 26 969 | 53 558,3 | | |
| | | | | | |
| *Ik1 = normaalikäytössä | | | | | |
| **Ik2 = mahdollisten rinnansyöttöjen ja keskusten yhteenkytkentöjen seurauksena | | | | | |
| | | | | | |

Käsinsuoritetut laskutoimitukset

Laskutoimituksen jokaiselle oikosulkuvirralle:

1CD - keskus

$$X_{Q1} \parallel X_{Q2} = \frac{1}{\frac{1}{0,0001 + j0,001} + \frac{1}{0,0001 + j0,001}}$$

$$= 0,00005 + j0,0005$$

$$Z_{total} = Z_1 + Z_2 + X_{t1} + X_{Q1} \parallel X_{Q2}$$

$$= 0,0201 + j0,0221$$

$$\Rightarrow 0,03 \angle 47,7^\circ$$

$$|k| = \frac{E_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,230}{0,03 \angle 47,7^\circ} = 7666,7 \angle -47,7^\circ \text{ A}$$

Seurava vaihe: lasketaan linjajännitejälta

$$Z_{total} = Z_1 + Z_2 + X_{t1} + X_{Q1}$$

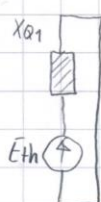
$$= 0,021 + j0,0226 = 0,031 \angle 47,1^\circ$$

$$|k| = \frac{1,230}{0,031 \angle 47,1^\circ} = 7419 \angle -47,1^\circ$$

1A) - keskus

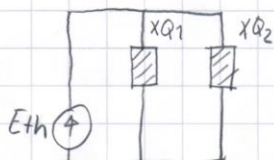
syöttö yhdellä muuntajalla (3916)

$$X_{Q1} = 0,175 + j 1,745 \Rightarrow 1,75 \angle 89^\circ$$



$$|k| = \frac{c E_{th}}{Z_{tot}} \Rightarrow \frac{1,1 \cdot \frac{20000}{\sqrt{3}}}{1,75 \angle 89^\circ} = 7258 \angle -89^\circ A$$

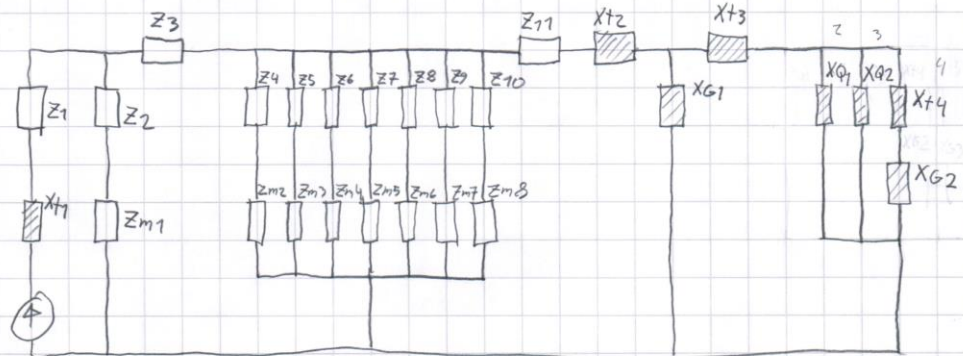
syöttö molemmilla muuntajilla



$$\frac{1}{Z_{total}} = \frac{1}{0,1745 + j 1,745} + \frac{1}{0,22 + j 2,2}$$

$$Z_{total} = 0,097 + j 0,97 \Rightarrow 0,97 \angle 84^\circ$$

$$|k| = \frac{c E_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 \cdot \frac{20000}{\sqrt{3}}}{0,97 \angle 84^\circ} = 13095 \angle -84^\circ A$$

3CU -keskus

redusoitu 0.4kv:

$$Z_1 = 0,00001 + j0,00001$$

$$Z_2 = 0,00001 + j0,00004$$

$$Z_3 = 0,00002 + j0,00001$$

$$Z_4 = 0,00003 + j0,00001$$

$$Z_5 = 0,00003 + j0,00001$$

$$Z_6 = 0,00002 + j0,00001$$

$$Z_7 = 0,00006 + j0,00002$$

$$Z_8 = 0,00006 + j0,00002$$

$$Z_9 = 0,00001 + j0,00001$$

$$Z_{10} = 0,00001 + j0,00001$$

$$Z_{11} = 0,00001 + j0,00001$$

$$X_{t1} = 0 + j0,0047$$

$$X_{t2} = 0 + j0,001$$

$$X_{t3} = 0 + j0,0001$$

$$X_{t4} = 0 + j0,0003$$

$$X_{G1} = 0 + j0,0003$$

$$X_{G2} = 0 + j0,0004$$

$$Z_{m1} = 0,008 + j0,014$$

$$Z_{m2} = 0,0076 + j0,0131$$

$$Z_{m3} = 0,0076 + j0,0137$$

$$Z_{m4} = 0,0076 + j0,0137$$

$$Z_{m5} = 0,01 + j0,018$$

$$Z_{m6} = 0,01 + j0,018$$

$$Z_{m7} = 0,0017 + j0,003$$

$$Z_{m8} = 0,0017 + j0,003$$

$$X_{Q1} = 0 + j0,0001$$

$$X_{Q2} = 0 + j0,0001$$

110kv verkko, generaattorit ja Sot omalähtömuuntajan + johdon impedanssi

$$Z_{S1} = X_{t4} + X_{G2} = 0 + j0,0007 \Omega$$

$$Z_{R1} = Z_{S1} + X_{Q1} + X_{Q2}$$

$$\frac{1}{Z_{R1}} = \frac{1}{0 + j0,0001} + \frac{1}{0 + j0,0001} + \frac{1}{0 + j0,0007}$$

$$Z_{R1} + X_{t3} = 0 + j0,00015 \Rightarrow Z_{S2}$$

$$Z_{R1} = 0 + j0,00005 \Omega$$

$$Z_{R2} = X_{G1} + Z_{S2} \Rightarrow \frac{1}{Z_{R2}} = \frac{1}{0 + j0,0003} + \frac{1}{0 + j0,00015} = 0 + j0,0001 \Omega$$

$$Z_{S3} = Z_{R2} + X_{t2} + Z_{11} = 0,00001 + j0,00111 \Omega$$

Jatkoa 3CU:lle

S01-laitoksen 6kV-tiskon moottoreiden impedanssi + aikaisempi

$$Z_{S4} = Z_{10} + Z_{m8} = 0,0017 + j0,003$$

$$Z_{S5} = Z_9 + Z_{m7} = 0,0017 + j0,003$$

$$Z_{S6} = Z_8 + Z_{m6} = 0,0101 + j0,018$$

$$Z_{S7} = Z_7 + Z_{m5} = 0,0101 + j0,018$$

$$Z_{S8} = Z_6 + Z_{m4} = 0,0076 + j0,013$$

$$Z_{S9} = Z_5 + Z_{m3} = 0,0076 + j0,013$$

$$Z_{S10} = Z_4 + Z_{m2} = 0,0076 + j0,013$$

$$Z_{R3} = Z_{S4} + Z_{S5} + Z_{S6} + Z_{S7} + Z_{S8} + Z_{S9} + Z_{S10} + Z_{S3}$$

$$\frac{1}{Z_{R3}} = \frac{1}{0,0017 + j0,003} + \frac{1}{0,0017 + j0,003} + \frac{1}{0,0101 + j0,018} + \frac{1}{0,0101 + j0,018} + \frac{1}{0,0076 + j0,013} + \frac{1}{0,0076 + j0,013} + \frac{1}{0,0076 + j0,013} + \frac{1}{0,00001 + j0,00117}$$

$$Z_{R3} = 0,00001 + j0,0005$$

loppu piiri

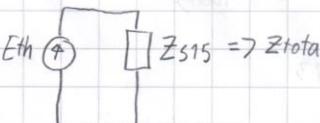
$$Z_{S11} = Z_{R3} + Z_3 = 0,00003 + j0,00051$$

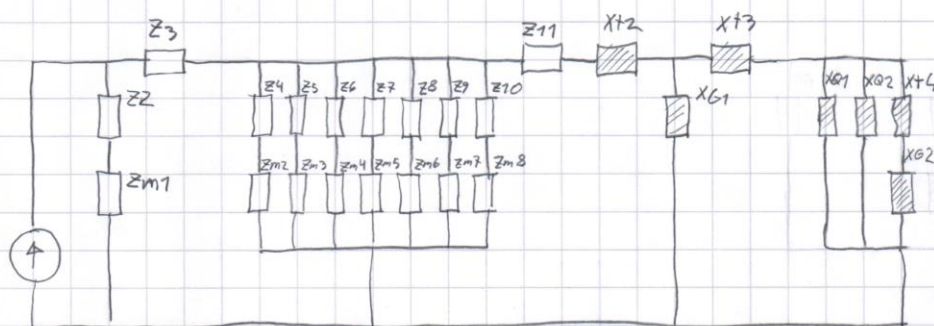
$$Z_{S12} = Z_2 + Z_{m1} = 0,008 + j0,014$$

$$Z_{R4} = Z_{S11} + Z_{S12} \Rightarrow \frac{1}{Z_{R4}} = \frac{1}{0,00003 + j0,00051} + \frac{1}{0,008 + j0,014}$$

$$Z_{R4} = 0,000029 + j0,00049$$

$$Z_{S13} = X_{t1} + Z_1 + Z_{R4} \Rightarrow 0,00004 + j0,0052 \Rightarrow 0,0052 \angle 89,5^\circ$$


 E_{th}
 $Z_{S15} \Rightarrow Z_{total}$
 $|k| = \frac{c E_{th}}{Z_{total}} \Rightarrow \frac{1 \cdot 230}{0,0052 \angle 89,5^\circ} = 44\,231 \angle -89,5^\circ A$

3BC-teskus

$$Z_{total}|_{400V} = 0,00049 \angle 86,6^\circ$$

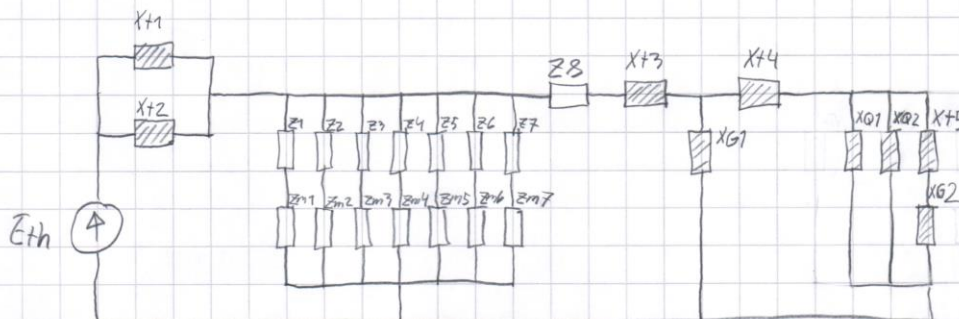
Redusaituna 6,3 kV-.

$$\left(\frac{6,3}{0,4}\right)^2 \cdot 0,00049 \angle 86,6^\circ = 0,122 \angle 86,6^\circ$$

$$|k| = \frac{1,1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot 0,122 \angle 86,6^\circ} = 32,8 \angle -86,6^\circ \text{ kA}$$

1CN - keskus

oikosulku muuntajien 1CT04 ja 1CT03 ollessa rinnan



$$X+1 \parallel X+2 = \frac{1}{0+j0,0057} + \frac{1}{0+j0,0057} = 0+j0,00285$$

6 kV:n moottoreilta 110 kV:n kiskoon impedanssi laskettu keskuksen 3CU kohdalla:

$$Z_{6kV-110kV} = 0,00001 + j0,0005$$

$$\begin{aligned} Z_{total} &= 0,00001 + j0,0005 + 0+j0,00285 \\ &= 0,00001 + j0,00335 \\ &\Rightarrow 0,00335 / 89,8^\circ \end{aligned}$$

$$|k| = \frac{c \cdot E_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 \cdot 230}{0,00335 / 89,8^\circ} = 68\,657 / -89,8^\circ \text{ A}$$

tapaus ilman muuntajien 1CT04 ja 1CT03 rinnan käyttöä

$$\begin{aligned} Z_{total} &= 0,00001 + j0,0005 + 0+j0,0057 = 0,00001 + j0,0062 \\ &\Rightarrow 0,0062 / 89,9^\circ \end{aligned}$$

$$|k| = \frac{c \cdot E_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 \cdot 230}{0,0062 / 89,9^\circ} = 37\,097 / -89,9^\circ \text{ A}$$

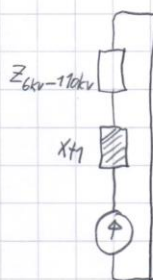
keskukset 1CH ja 1CG

ilman rinnan kytkentää

1CH

$$Z_{total} = 0,0062 \angle 89,9^\circ$$

$$I_k = 37\,097 \angle -89,9^\circ$$

Noin sama I_k kuin keskubiella 1CNRinnan kytkettynä $I_k = 68\,657 \angle -89,8^\circ$, laskut kohdassa 1CN1CG

$$\begin{aligned} Z_{total} &= 0,00001 + j0,0005 + 0 + j0,0057 \\ &= 0,00001 + j0,0062 \\ &\Rightarrow 0,0062 \angle 89,9^\circ \end{aligned}$$

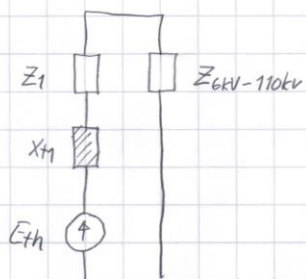
$$I_k = \frac{1,230}{0,0062 \angle 89,9^\circ} = 37\,097 \angle -89,9^\circ \text{ A}$$

Rinnan kytkettynä $I_k = 68\,657 \angle -89,9^\circ \text{ A}$

1CA- ja 1CB-keskukset

ilman rinnankytkentää

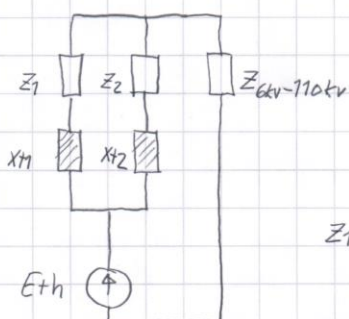
1CA - ja 1CB-keskusten oikosulkurita



$$\begin{aligned}
 Z_{total} &= Z_{6kv-110kv} + Z_1 + X_{t1} \\
 &= 0,00001 + j0,0005 + 0,00001 + j0,00001 \\
 &\quad + 0 + j0,0056 \\
 Z_{total} &= 0,00004 + j0,00611 \\
 &= 0,0061 \angle 89,6^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 |k| &= \frac{c \cdot E_{th}}{Z_{total}} \\
 &= \frac{1 \cdot 230}{0,0061 \angle 89,6^\circ} = 37\,705 \angle -89,6^\circ \text{ A}
 \end{aligned}$$

rinnankytkentä käytössä



$$\begin{aligned}
 Z_1 + X_{t1} &= 0,00001 + j0,00001 + 0 + j0,0056 \\
 &= 0,00001 + j0,00561
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_2 + X_{t2} &= 0,00001 + j0,00001 + 0 + j0,0055 \\
 &= 0,00001 + j0,00551
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_1 + X_{t1} \parallel Z_2 + X_{t2} &= \frac{1}{0,00001 + j0,00561} + \frac{1}{0,00001 + j0,00551} \\
 &= 0,000005 + j0,00278
 \end{aligned}$$

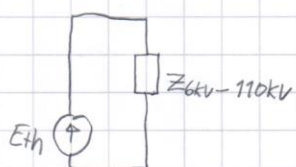
$$\begin{aligned}
 Z_{total} &= (Z_1 + X_{t1} \parallel Z_2 + X_{t2}) + Z_{6kv-110kv} \\
 &= 0,000015 + j0,0033 = 0,0033 \angle 89,3^\circ
 \end{aligned}$$

$$|k| = \frac{c E_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 \cdot 230}{0,0033 \angle 89,3^\circ} = 69\,697 \angle -89,3^\circ \text{ A}$$

1BB- ja 1BA- keskus

400V:lle

$$Z_{6kv-110kv} = 0,0001 + j 0,0005 \Rightarrow 0,0005 \angle 88,8^\circ$$

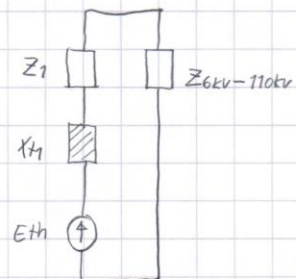


Redusoidaan 6kv-tasoon:

$$\left(\frac{6,3}{0,4}\right)^2 \cdot 0,0005 \angle 88,8^\circ = 0,124 \angle 88,8^\circ$$

$$|k| = \frac{c \cdot E_{th}}{Z_{total}} \Rightarrow \frac{7,1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot 0,124 \angle 88,8^\circ} = 32\,266 \angle -88,8^\circ \text{ A}$$

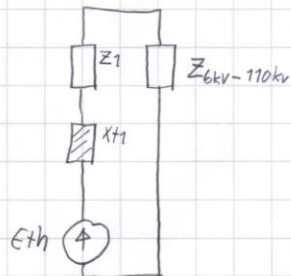
ICC-keskus



$$\begin{aligned} Z_{total} &= Z_1 + X_H + Z_{6kv-110kv} \\ &= 0,00013 + j0,00006 + 0 + j0,0058 \\ &\quad + 0,00001 + j0,0005 \\ &= 0,00016 + j0,0064 \\ &\Rightarrow 0,0064 \angle 88,6^\circ \end{aligned}$$

$$|k| = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 \cdot 230}{0,0064 \angle 88,6^\circ} = 35\,938 \angle -88,6^\circ \text{ A}$$

keskus BCA

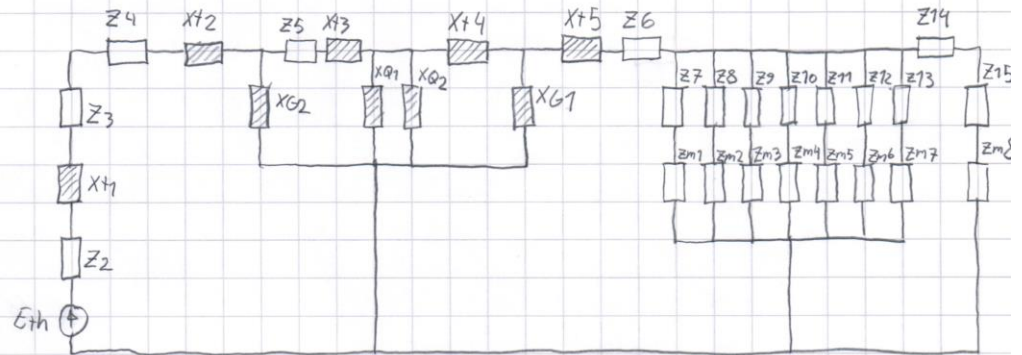


$$\begin{aligned} Z_{total} &= Z_1 + X_{T1} + Z_{6kv-110kv} \\ &= 0,00001 + j0,0005 + 0 + j0,0051 \\ &\quad + 0,00008 + j0,00005 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 0,00009 + j0,00565 \\ &\Rightarrow 0,0057 / 89,1^\circ \end{aligned}$$

$$|K = \frac{c E_{th}}{0,0057 / 89,1^\circ} = \frac{1 \cdot 230}{0,0057 / 89,1^\circ} = 40\,351 / -89,1^\circ \text{ A}$$

6CA-keskus



$$Z = R + jX$$

$$\begin{aligned} Z_2 &= 0 \text{ (kisko)} \\ Z_3 &= 0,00003 + j0,00002 \\ Z_4 &\approx 0 \\ Z_5 &\approx 0 \\ Z_6 &= 0,00001 + j0,00001 \\ Z_7 &= 0,00001 + j0,00001 \\ Z_8 &= 0,00001 + j0,00001 \\ Z_9 &= 0,00006 + j0,00002 \\ Z_{10} &= 0,00006 + j0,00002 \\ Z_{11} &= 0,00002 + j0,00001 \\ Z_{12} &= 0,00003 + j0,00001 \\ Z_{13} &= 0,00003 + j0,00001 \\ Z_{14} &= 0,00002 + j0,00001 \\ Z_{15} &= 0,00001 + j0,00004 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{t1} &= 0 + j0,008 \\ X_{t2} &= 0 + j0,004 \\ X_{t3} &= 0 + j0,00026 \\ X_{t4} &= 0 + j0,0001 \\ X_{t5} &= 0 + j0,0001 \\ X_{G1} &= 0 + j0,0001 \\ X_{G2} &= 0 + j0,0001 \\ X_{G1} &= 0 + j0,0003 \\ X_{G2} &= 0 + j0,0004 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{m1} &= 0,0017 + j0,0003 \\ Z_{m2} &= 0,0017 + j0,0003 \\ Z_{m3} &= 0,01 + j0,018 \\ Z_{m4} &= 0,01 + j0,018 \\ Z_{m5} &= 0,0076 + j0,0131 \\ Z_{m6} &= 0,0076 + j0,0131 \\ Z_{m7} &= 0,0076 + j0,0131 \\ Z_{m8} &= 0,008 + j0,014 \end{aligned}$$

$$Z_{R1} = Z_{S1} + Z_{S2} + \dots + Z_{S8}$$

$$\begin{aligned} Z_{S1} &= Z_{14} + Z_{15} + Z_{m8} = 0,00803 + j0,01405 \\ Z_{S2} &= Z_{13} + Z_{m7} = 0,0076 + j0,0131 \\ Z_{S3} &= Z_{12} + Z_{m6} = 0,0076 + j0,0131 \\ Z_{S4} &= Z_{11} + Z_{m5} = 0,0076 + j0,0131 \\ Z_{S5} &= Z_{10} + Z_{m4} = 0,0101 + j0,018 \\ Z_{S6} &= Z_9 + Z_{m3} = 0,0101 + j0,018 \\ Z_{S7} &= Z_8 + Z_{m2} = 0,0017 + j0,003 \\ Z_{S8} &= Z_7 + Z_{m1} = 0,0017 + j0,003 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_{R1}} &= \frac{1}{0,00803 + j0,01405} + \frac{1}{0,0076 + j0,0131} + \frac{1}{0,0076 + j0,0131} + \frac{1}{0,0076 + j0,0131} + \frac{1}{0,0101 + j0,018} \\ &+ \frac{1}{0,0101 + j0,018} + \frac{1}{0,0017 + j0,003} + \frac{1}{0,0017 + j0,003} = 0,00053 + j0,00093 \end{aligned}$$

Jatkoa 6CA:lle

$$Z_{S9} = Z_{R1} + Z_6 + X_{t5} = 0,00054 + j0,00194$$

$$Z_{R2} = Z_{S9} + X_{G1} \Rightarrow \frac{1}{Z_{R2}} = \frac{1}{0,00054 + j0,00194} + \frac{1}{0 + j0,0003}$$

$$Z_{R2} = 0,00054 + j0,00026$$

$$Z_{S10} = Z_{R2} + X_{t4}$$

$$Z_{S10} = 0,00054 + j0,00036$$

$$Z_{R3} = Z_{S10} + X_{G2} + X_{G2} \Rightarrow \frac{1}{Z_{R3}} = \frac{1}{0,00054 + j0,00036} + \frac{1}{0 + j0,0001} + \frac{1}{0 + j0,0001}$$

$$Z_{R3} = 0,00054 + j0,000044$$

$$Z_{S11} = Z_{R3} + X_{t3} + Z_5 = 0,00054 + j0,000304$$

$$Z_{R4} = Z_{S11} + X_{G1} \Rightarrow \frac{1}{Z_{R4}} = \frac{1}{0,00054 + j0,000304} + \frac{1}{0 + j0,0004}$$

$$Z_{R4} = 0,00054 + j0,00017$$

$$Z_{total} = Z_{R4} + X_{t2} + Z_4 + Z_3 + X_{t1} + Z_2$$

$$Z_{total} = 0,00057 + j0,0122 \Rightarrow 0,0122 \angle 87,3^\circ \Omega$$

$$|k| = \frac{CE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 \cdot 230}{0,0122 \angle 87,3^\circ} = 18\,853 \angle -87,3^\circ A$$

jos käytetään varalla olevaa KL-pumppua, oikosulkuvirta on seuraava:

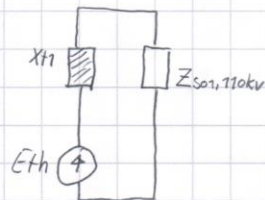
$$Z_{KL-pumppu} = 0,012 + j0,021 \quad Z_{R4} + X_{t2} = 0,00054 + j0,000477 = Z_{S12}$$

$$Z_{KL-pumppu} \parallel Z_{S12} = 0,0005 + j0,00032 = Z_{R5}$$

$$Z_{total} = Z_{R5} + Z_3 + X_{t1} = 0,00053 + j0,01122 \Rightarrow 0,0112 \angle 87,3^\circ$$

$$|k| = \frac{230}{0,0112 \angle 87,3^\circ} = 20\,536 \angle -87,3^\circ A$$

GBA-keskus



$$Z_{S01, 110kV, 400V} = 0,00054 + j0,00017 \Rightarrow 0,00057 \angle 17,5^\circ$$

Redusoidaan 6,3kV:

$$\left(\frac{6,3}{0,4}\right)^2 \cdot 0,00057 \angle 17,5^\circ = 0,14 \angle 17,5^\circ$$

$$= 0,134 + j0,042$$

$$Z_{total} = X_1 + Z_{S01, 110kV, 6,3kV}$$

$$= 0 + j0,99 + 0,134 + j0,042$$

$$Z_{total} = 0,134 + j1,03$$

$$\Rightarrow 1 \angle 82,3^\circ$$

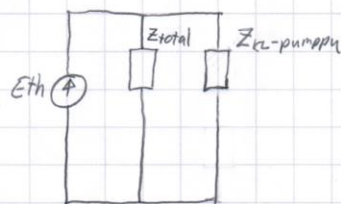
$$|k| = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot 1} = 4001A$$

Varallaolevan KL-pumpun kanssa:

$$Z_{KL-pumppu, 400V} = 0,012 + j0,021 \Rightarrow 0,0242 \angle 60,2^\circ$$

Redusoidaan 6,3kV:

$$Z_{KL-pumppu, 6,3kV} = \left(\frac{6,3}{0,4}\right)^2 \cdot 0,0242 \angle 60,2^\circ = 6 \angle 60,2^\circ \Rightarrow 2,97 + j5,21$$



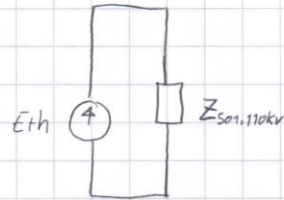
$$\frac{1}{Z_{total2}} = \frac{1}{Z_{total}} + \frac{1}{Z_{KL-pumppu}}$$

$$= \frac{1}{0,134 + j1,03} + \frac{1}{2,97 + j5,21}$$

$$Z_{total2} = 0,128 + j0,833 \Rightarrow 0,84 \angle 81,3^\circ$$

$$|k| = \frac{1,1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot 0,84 \angle 81,3^\circ} = 4763,1 \angle -81,3^\circ A$$

6AP-keskus



$$Z_{S01,110kV,400V} = 0,00054 + j0,00017 = 0,00057 \angle 17,5^\circ$$

Redusoidaan 10,5 kV:

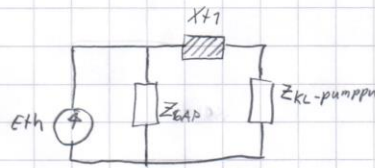
$$Z_{S01,110kV,10,5kV} = \left(\frac{10,5}{0,4}\right)^2 \cdot 0,00057 \angle 17,5^\circ$$

$$= 0,393 \angle 17,5^\circ = 0,375 + j0,118$$

$$|k| = \frac{c \cdot E_{th}}{Z_{total}}$$

$$= \frac{1,1 \cdot 10500}{\sqrt{3} \cdot 0,393 \angle 17,5^\circ} = 16\,968 \angle -17,5^\circ A$$

Varalla oleva KL-pumppu mukaan:



$$Z_{S1} = X+1 + Z_{KL-pumppu}$$

$$= 0 + j2,646 + 8,33 + j14,43$$

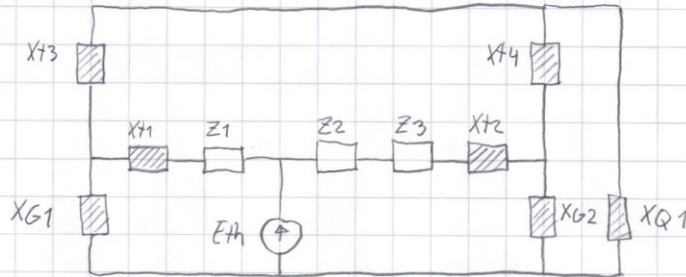
$$= 8,33 + j17,076$$

$$\frac{1}{Z_{total}} = \frac{1}{Z_{S1}} + \frac{1}{Z_{GAP}}$$

$$Z_{total} = 0,359 + j0,117 = 0,378 \angle 18,1^\circ$$

$$|k| = \frac{c E_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 \cdot 10500}{\sqrt{3} \cdot 0,378 \angle 18,1^\circ} = 17\,641,3 \angle -18,1^\circ A$$

2BBA-keskus



$$Z_1 = 0,034 + j0,0095$$

$$X_{t1} = 0 + j0,882$$

$$X_{G1} = 0 + j0,099$$

$$Z_2 = 0,0014 + j0,0004$$

$$X_{t2} = 0 + j0,882$$

$$X_{G2} = 0 + j0,171$$

$$Z_3 = 0,013 + j0,0037$$

$$X_{t3} = 0 + j0,073$$

$$X_{Q1} = 0 + j0,038$$

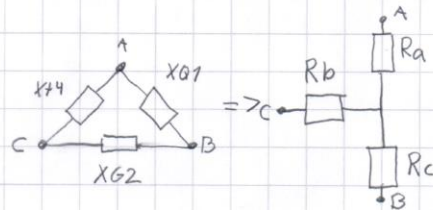
$$X_{t4} = 0 + j0,172$$

$$X_{Q1} = 0 + j0,038$$

$$Z_{s1} = X_{t1} + Z_1 = 0,034 + j0,892$$

$$Z_{s2} = Z_2 + Z_3 + X_{t2} = 0,0144 + j0,886$$

tähtikolmio-muunnos impedansseissa X_{t4} , X_{G2} ja X_{Q1} :



$$R_a = \frac{X_{t4} \cdot X_{Q1}}{X_{G2} + X_{t4} + X_{Q1}} = \frac{0,174 \angle 90^\circ \cdot 0,038 \angle 90^\circ}{0 + j0,171 + 0 + j0,172 + 0 + j0,038} = \frac{0,0066 \angle 180^\circ}{0,381 \angle 90^\circ}$$

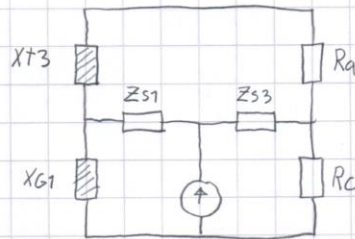
$$R_a = 0,0173 \angle 90^\circ \Rightarrow 0 + j0,0173$$

$$R_b = \frac{X_{t4} \cdot X_{G2}}{X_{G2} + X_{t4} + X_{Q1}} = \frac{0,174 \angle 90^\circ \cdot 0,171 \angle 90^\circ}{0,381 \angle 90^\circ} = 0,078 \angle 90^\circ \Rightarrow 0 + j0,078$$

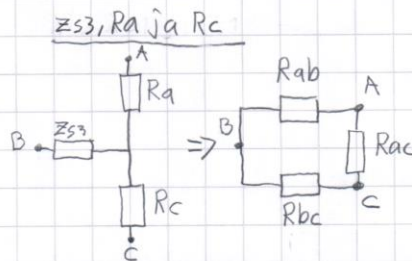
$$R_c = \frac{X_{G2} \cdot X_{Q1}}{X_{G2} + X_{t4} + X_{Q1}} = \frac{0,171 \angle 90^\circ \cdot 0,038 \angle 90^\circ}{0,381 \angle 90^\circ} = 0,017 \angle 90^\circ \Rightarrow 0 + j0,017$$

Jatkoa 2BBA:lle

$$Z_{s3} = Z_{s2} + R_b = 0,0144 + j0,964 \Rightarrow 0,964 \angle 89^\circ$$



tehdään tähtikolmio-muunnos impedansseissa $X+3$, $XG1$ ja Z_{s1} sekä Z_{s3} , R_a ja R_c :



$$R_{ab} = R_a + Z_{s3} + \frac{R_a \cdot Z_{s3}}{R_c} = 0 + j0,0173 + 0,0144 + j0,964 + \frac{0,0167 \angle 179^\circ}{0,017 \angle 90^\circ}$$

$$= 0 + j0,0173 + 0,0144 + j0,964 + 0,0163 + j0,933 = 0,031 + j1,914$$

$$R_{bc} = Z_{s3} + R_c + \frac{Z_{s3} \cdot R_c}{R_a} = 0,0144 + j0,964 + 0 + j0,017 + \frac{0,0164 \angle 179^\circ}{0,0173 \angle 90^\circ}$$

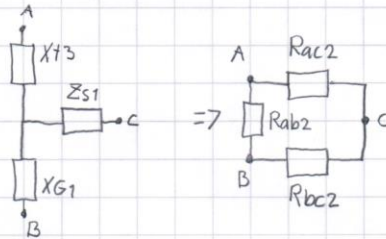
$$= 0,0144 + j0,964 + 0 + j0,017 + 0,0165 + j0,948 = 0,031 + j1,929$$

$$R_{ac} = R_a + R_c + \frac{R_a \cdot R_c}{Z_{s3}} = 0 + j0,0173 + 0 + j0,017 + \frac{0,0003 \angle 180^\circ}{0,964 \angle 89^\circ}$$

$$= 0 + j0,0173 + 0 + j0,017 + 0 + j0,0003 = 0 + j0,0346$$

Jatkoa 2BBA:lle

X_{t3}, X_{G1} ja Z_{S1}



$$R_{ab2} = X_{t3} + X_{G1} + \frac{X_{t3} \cdot X_{G1}}{Z_{S1}} = 0 + j0,073 + 0 + j0,099 + \frac{0,0072 \angle 180^\circ}{0,893 \angle 89^\circ}$$

$$= 0 + j0,073 + 0 + j0,099 + 0 + j0,008 = 0 + j0,18$$

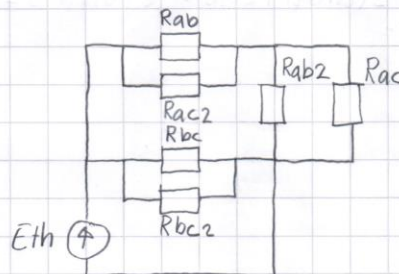
$$R_{bc2} = X_{G1} + Z_{S1} + \frac{X_{G1} \cdot Z_{S1}}{X_{t3}} = 0 + j0,099 + 0,034 + j0,892 + \frac{0,088 \angle 179^\circ}{0,073 \angle 90^\circ}$$

$$= 0 + j0,099 + 0,034 + j0,892 + 0,02 + j1,21 = 0,054 + j2,2$$

$$R_{ac2} = X_{t3} + Z_{S1} + \frac{X_{t3} \cdot Z_{S1}}{X_{G1}} = 0 + j0,073 + 0,034 + j0,892 + \frac{0,065 \angle 179^\circ}{0,099 \angle 90^\circ}$$

$$= 0 + j0,073 + 0,034 + j0,892 + 0,017 + j0,656$$

$$R_{ac2} = 0,045 + j1,621$$



$$\frac{1}{Z_{R1}} = \frac{1}{R_{ab}} + \frac{1}{R_{ac2}}$$

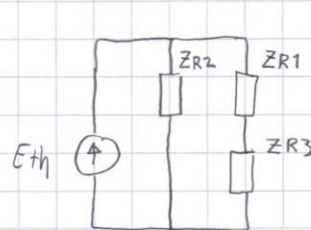
$$= \frac{1}{0,037 + j1,914} + \frac{1}{0,045 + j1,621}$$

$$Z_{R1} = 0,018 + j0,878$$

$$\frac{1}{Z_{R2}} = \frac{1}{R_{bc}} + \frac{1}{R_{bc2}} = \frac{1}{0,037 + j1,929} + \frac{1}{0,054 + j2,2} = 0,0197 + j1,028$$

$$\frac{1}{Z_{R3}} = \frac{1}{R_{ab2}} + \frac{1}{R_{ac}} = \frac{1}{0 + j0,18} + \frac{1}{0 + j0,0346} = 0 + j0,029$$

Jatkoa 2BBA:lle



$$Z_{S4} = Z_{R1} + Z_{R3} = 0,018 + j0,907$$

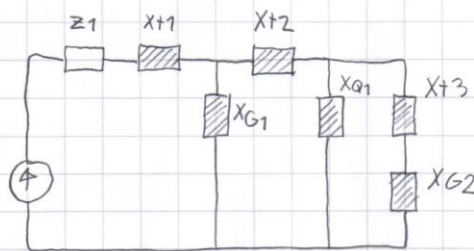
$$\frac{1}{Z_{total}} = \frac{1}{Z_{R2}} + \frac{1}{Z_{S4}} = \frac{1}{0,0197 + j1,028} + \frac{1}{0,018 + j0,907}$$

$$Z_{total} = 0,0094 + j0,482$$

$$= 0,482 \angle 88,9^\circ$$

$$|k| = \frac{c \cdot E_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 \cdot 10500}{\sqrt{3} \cdot 0,482 \angle 88,9^\circ} = 13\,835 \angle -88,9^\circ \text{ A}$$

Syöttö yhdellä generaattorilla (ei rinnankäyttöä):



$$Z_{S1} = X_{13} + X_{G2} = 0 + j0,343$$

$$Z_{R1} = Z_{S1} + X_{Q1} = \frac{1}{0 + j0,343} + \frac{1}{0 + j0,038} = 0 + j0,0342$$

$$Z_{S2} = Z_{R1} + X_{12} = 0 + j0,1072$$

$$Z_{R2} = Z_{S2} + X_{G1} = \frac{1}{0 + j0,1072} + \frac{1}{0 + j0,099} = 0 + j0,0515$$

Jatkoa 2BBA:lle

$$Z_{total} = Z_1 + X_{t1} + Z_{R2} = 0,034 + j0,943 \\ \Rightarrow 0,944 \angle 88^\circ$$

$$|k| = \frac{CE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,1 \cdot 10500}{\sqrt{3} \cdot 0,944 \angle 88^\circ} = 7064 \angle -88^\circ \text{ A}$$

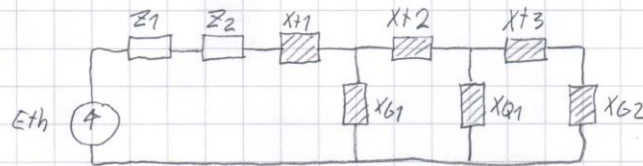
2BBB-keskus

Syötte molempien omakäyttömuuntajien kautta keskusten 2BBA ja 2BBB ollessa yhdessä:

avkosulkyvirta laskettu kohdassa 2BBA-ja 2BBBkeskus

$$|k| = 13\,835 \angle -88.9^\circ \text{ A}$$

Syötte vain omakäyttömuuntajan 2BBT10 kautta:



$$\begin{array}{lll} Z_1 = 0.0014 + j0.0004 & X_{T1} = 0 + j0.882 & X_{G1} = 0 + j0.099 \\ Z_2 = 0.034 + j0.0095 & X_{T2} = 0 + j0.073 & X_{G2} = 0 + j0.177 \\ & X_{T3} = 0 + j0.172 & X_{Q1} = 0 + j0.038 \end{array}$$

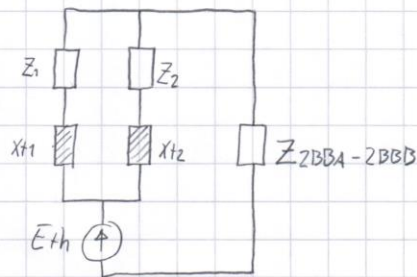
$$Z_{2BBA} = 0.1034 + j0.1943$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{total}} &= Z_{2BBA} + Z_1 = 0.10354 + j0.19434 \\ &\Rightarrow 0.1944 \angle 88^\circ \end{aligned}$$

$$|k| = \frac{7.1 \cdot 10500}{\sqrt{3} \cdot 0.1944 \angle 88} = 7064$$

2BFA- ja 2BFB-keskukset

oikosulkuvirta generaattoreiden ollessa kinnassa sekä keskusten ollessa yhdessä:



$$\begin{aligned} Z_1 &= 0,000018 + j0,00001 & X_{11} &= 0 + j0,0114 \\ Z_2 &= 0,000018 + j0,00001 & X_{12} &= 0 + j0,0114 \end{aligned}$$

$$Z_{s1} = X_{11} + Z_1 = 0,000018 + j0,01141$$

$$Z_{s2} = X_{12} + Z_2 = 0,000018 + j0,01141$$

$$Z_{R1} = Z_{s1} \parallel Z_{s2} = 0,000009 + j0,005705$$

$$Z_{2BFA-2BFB105} = 0,482 \angle 88,9^\circ$$

Redusoidaan 690V:lle:

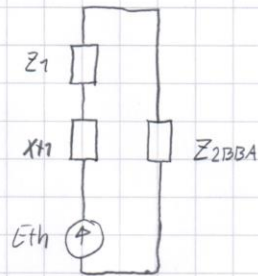
$$Z_{2BFA-2BFB690} = \left(\frac{0,69}{10,5}\right)^2 \cdot 0,482 \angle 88,9^\circ = 0,0021 \angle 88,9^\circ \Rightarrow 0,00004 + j0,0021$$

$$\begin{aligned} Z_{total} &= Z_{2BFA-2BFB690} + Z_{R1} = 0,00005 + j0,00781 \\ &\Rightarrow 0,00781 \angle 89,6^\circ \end{aligned}$$

$$|K| = \frac{CE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,05 \cdot 690}{\sqrt{3} \cdot 0,00781 \angle 89,6^\circ} = 53558,3 \angle -89,6^\circ A$$

Oikosulkuvirta keskusten ollessa erikseen sekä generaattorit eivät ole rinnan:

ZBFA



$$X_{11} = 0 + j0.0174$$

$$Z_1 = 0.000018 + j0.00001$$

$$Z_{2BBA105} = 0.944 \angle 88^\circ$$

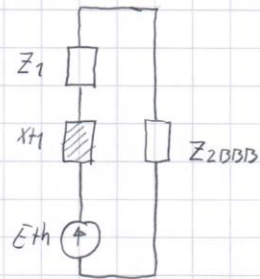
Reduso:daan 690V:lle

$$Z_{2BBA690} = \left(\frac{0.69}{10.5}\right)^2 \cdot 0.944 \angle 88^\circ = 0.0041 \angle 88^\circ \Rightarrow 0.00014 + j0.0041$$

$$Z_{total} = Z_{2BBA690} + X_{11} + Z_1 = 0.000158 + j0.01557 \Rightarrow 0.01551 \angle 89.4^\circ$$

$$|k| = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1.05 \cdot 690}{\sqrt{3} \cdot 0.01551 \angle 89.4^\circ} = 26\,969 \angle -89.4^\circ \text{ A}$$

ZBFB



$$X_H = 0 + j0,0114$$

$$Z_1 = 0,000018 + j0,00001$$

$$Z_{2BFB10,5} = 0,944 \angle 88^\circ$$

Redusoidaan 690V:lle

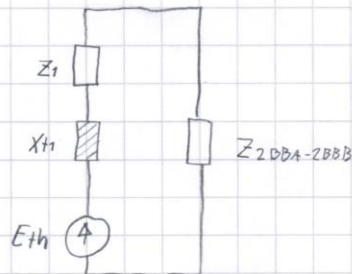
$$Z_{2BFB690} = \left(\frac{0,69}{10,5}\right)^2 \cdot 0,944 \angle 88^\circ = 0,0047 \angle 88^\circ = 0,00014 + j0,0041$$

$$Z_{total} = Z_{2BFB690} + X_H + Z_1 = 0,000158 + j0,01551 \\ = 0,01551 \angle 89,4^\circ$$

$$|k| = \frac{c \cdot E_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,05 \cdot 690}{\sqrt{3} \cdot 0,01551 \angle 89,4^\circ} = 26\,969 \angle -89,4^\circ A$$

2 BFC - keskus

generaattoreiden ollessa kiinnän kytkettynä:



arvot redusoidu 690V:lle

$$Z_1 = 0,00009 + j0,00005$$

$$X_{th} = 0 + j0,0143$$

$$Z_{2BBA-2BBB_{10,5}} = 0,0094 + j0,482 \Rightarrow 0,482 \angle 88,9^\circ$$

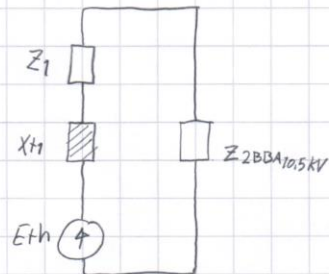
Redusoidaan 690V:lle:

$$Z_{2BBA-2BBB_{690}} = \left(\frac{0,69}{10,5} \right)^2 \cdot 0,482 \angle 88,9^\circ = 0,0021 \angle 88,9^\circ \Rightarrow 0,00004 + j0,0021$$

$$Z_{total} = X_{th} + Z_1 + Z_{2BBA-2BBB_{690}} = 0,00013 + j0,01645 \Rightarrow 0,016 \angle 89,5^\circ$$

$$|k| = \frac{E_{th}}{Z_{total}} = \frac{1,05 - 690}{\sqrt{3} \cdot 0,016 \angle 89,5^\circ} = 26\,143 \angle -89,5^\circ \text{ A}$$

ilman generaattoreiden kinnan käyttöä:



$$Z_1 = 0,00009 + j0,00005$$

$$X_{t1} = 0 + j0,0143$$

$$Z_{2BBA10,5} = 0,034 + j0,943 \rightarrow 0,944 \angle 88^\circ$$

Redusoidaan 690V:lle:

$$Z_{2BBA690} = \left(\frac{0,69}{10,5} \right)^2 \cdot 0,944 \angle 88^\circ = 0,0041 \angle 88^\circ = 0,00014 + j0,0041$$

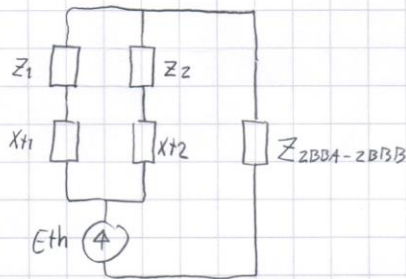
$$Z_{total} = Z_{2BBA690} + X_{t1} + Z_1 = 0,00023 + j0,01845$$

$$\Rightarrow 0,0185 \angle 89,3^\circ$$

$$|k| = \frac{1,05 \cdot 690}{\sqrt{3} \cdot 0,0185 \angle 89,3^\circ} = 22\,610,3 \angle -89,3^\circ \text{ A}$$

2BHA- ja 2BHB-keskukset

oikosulkuvirta generaattoreiden ollessa kiinnän sekä keskusten ollessa yhdessä:



$$X_{11} = 0 + j0,006$$

$$X_{12} = 0 + j0,006$$

$$Z_1 = 0,000005 + j0,000003$$

$$Z_2 = 0,000005 + j0,000003$$

$$Z_{S1} = X_{11} + Z_1 = 0,000005 + j0,006$$

$$Z_{S2} = X_{12} + Z_2 = 0,000005 + j0,006$$

$$Z_{R1} = Z_{S1} \parallel Z_{S2} = 0,0000025 + j0,003$$

$$Z_{2BBA-2BBB10,5} = 0,482 \angle 88,9^\circ$$

Redusoidaan 400V:lle:

$$Z_{2BBA-2BBB400} = \left(\frac{0,4}{10,5}\right)^2 \cdot 0,482 \angle 88,9^\circ = 0,0007 \angle 88,9^\circ = 70,000013 + j0,0007$$

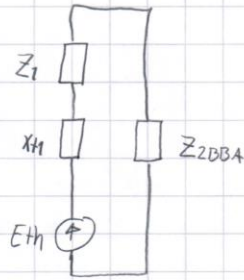
$$Z_{total} = Z_{2BBA-2BBB400} + Z_{R1} = 0,000016 + j0,0037$$

$$\Rightarrow 0,0037 \angle 89,8^\circ$$

$$I_k = \frac{c E_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0,0037 \angle 89,8^\circ} = 62\,416 \angle -89,8^\circ \text{ A}$$

oikosulkuvirta keskusten ollessa erikseen sekä generaattorit eivät ole rinnan!

ZBHA:



$$X_{H1} = 0 + j0,006$$

$$Z_1 = 0,000005 + j0,000003$$

$$Z_{ZBBA10,5} = 0,944 \angle 88^\circ$$

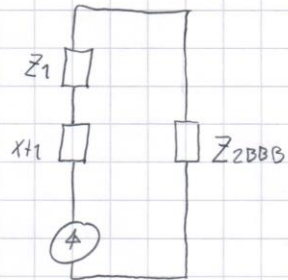
Redusoidaan 400V:lle:

$$Z_{ZBBA400} = \left(\frac{0,4}{10,5}\right)^2 \cdot 0,944 \angle 88^\circ = 0,00137 \angle 88^\circ = 70,00005 + j0,00137$$

$$Z_{total} = Z_{ZBBA400} + X_{H1} + Z_1 = 0,000055 + j0,007373 \\ \Rightarrow 0,0074 \angle 89,6^\circ$$

$$I_k = \frac{cE_{th}}{Z_{total}} = \frac{1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0,0074 \angle 89,6^\circ} = 31\,208 \angle -89,6^\circ \text{ A}$$

ZBHB :



$$X_1 = 0 + j 0,006$$

$$Z_1 = 0,000005 + j 0,000003$$

$$Z_{BHB105} = 0,944 \angle 88^\circ$$

Redusoidaan 400V:lle:

$$Z_{BHB400} = \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 \cdot 0,979 \angle 89^\circ = 0,00137 \angle 88^\circ = 0,000005 + j 0,00137$$

$$Z_{total} = Z_{BHB400} + X_1 + Z_1 = 0,000055 + j 0,007373 \\ = 0,0074 \angle 89,6^\circ$$

$$|k| = \frac{1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0,0074 \angle 89,6^\circ} = 31 \text{ 208} \angle -89,6^\circ \text{ A}$$